

Konzeption und Untersuchung einer Panoramaanzeige zur Steigerung des Raumbewusstseins von Piloten

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Christoph Möller

aus Saalfeld an der Saale

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Dr. h.c. Alf Zimmer
Tag der Einreichung:	02.08.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	29.11.2016

Darmstadt 2017

D17

Zusammenfassung

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle eines modernen Flugzeuges stellt eine hochkomplexe Arbeitsumgebung dar. Das Aufgabenspektrum und die daraus resultierenden Anforderungen an das Cockpitpersonal sind umfassend und vielseitig. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems „Mensch-Maschine“ stellt der Mensch zunehmend das limitierende Element dar. Eine große Herausforderung aktueller Flugzeugentwicklungen besteht deshalb darin, die Mensch-Maschine-Schnittstelle unter der Prämisse einer maximierten Pilotenleistung zu optimieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Entwicklung eines neuartigen Formates zur Darstellung räumlicher Informationen das Situationsbewusstsein des Piloten bei der Interaktion mit Cockpitdisplays zu steigern. Basierend auf einer großflächigen Displaytechnologie wird ein Visualisierungskonzept entwickelt, das die Vorteile verschiedener konventioneller Darstellungsformen vereint. Im Konkreten sollen die Vorzüge egozentrischer perspektivischer Ansichten auf globaler Ebene umgesetzt werden, indem das horizontale Blickfeld auf 360° zu einer Panoramaansicht erweitert wird. Eine zusätzliche Darstellung zur Generierung von globalem Situationsbewusstsein wird dadurch obsolet.

Auf Grundlage einer domänenspezifischen Aufgabenanalyse werden repräsentative Cockpittätigkeiten identifiziert. Nach einer ausführlichen Analyse der Eigenschaften der Panoramaansicht werden zwei Aufgaben für eine bewertende Untersuchung ausgewählt. Im Rahmen von zwei vergleichenden Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit von Probanden unter Verwendung des neuartigen Formats mit der Leistungsfähigkeit unter Verwendung zweier konventioneller Darstellungen verglichen. Als konventionelle Darstellungen werden ein zweidimensionales und ein exozentrisches Format ausgewählt. Für die Datenerfassung wird auf Probanden mit fliegerischer Erfahrung zurückgegriffen. Neben aktiven Airbus Testpiloten sind dies auch ehemalige Piloten der deutschen Luftwaffe sowie Waffensystemingenieure.

Die Ergebnisse beider Versuche verdeutlichen Leistungsunterschiede bei Verwendung der verschiedenen Ansichten. Entgegen der Erwartung ist das entwickelte Panoramaformat für keine der untersuchten Aufgaben zu empfehlen. Während im Vergleich mit der zweidimensionalen Darstellung einige Leistungsvorteile zu Gunsten des Panoramaformats ermittelt werden, schneidet das Panoramaformat im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht stets schlechter ab.

Die Ursache der Leistungsminderung lässt sich im Wesentlichen durch zwei Effekte begründen: dem Hemisphärenereffekt und der Trajektorientransformation. Der Hemisphärenereffekt umfasst das Phänomen, dass das Verständnis von Objektpositionen der hinteren Hemisphäre in einer perspektivischen Ansicht mehr kognitive Ressourcen erfordert, als das Verständnis von Objektpositionen der vorderen Hemisphäre. Mit der Trajektorientransformation wird die Besonderheit der Panoramaansicht beschrieben, das Krümmungsverhalten von Flugtrajektorien in eine dem Operateur ungewohnte Art zu transformieren. Inwieweit beiden leistungshemmenden Effekten durch zusätzliches Training mit der neuartigen Ansicht begegnet werden kann, wird nicht evaluiert.

Obgleich die Nutzerakzeptanz bezüglich des neuartigen Raumformates hoch ist, kann für die untersuchten Aufgaben keine abschließende Empfehlung für den Einsatz im Flugzeugcockpit ausgesprochen werden. Das Potenzial für andere Anwendungsfälle, insbesondere im Bereich der Integration von Sensorbildern oder als Assistenzdisplay, wird dennoch als hoch eingestuft. Eine Evaluierung dieser Vermutung könnte Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein.

Abstract

The human machine interface of a modern aircraft is a highly complex working environment. The resulting cockpit personnel requirements are extensive and various. With respect to the performance of the overall human machine system, the human individual increasingly represents the bottleneck. Thus a major challenge of current flight deck development activities comprises the optimization of the human machine interface, aiming to maximize the pilot performance.

The objective of this paper is the development and evaluation of a novel display concept to visualize spatial information. This is to be achieved by the increased pilot situational awareness generated during interaction with the cockpit displays. Based on a large area screen, a visualization concept is developed that combines the advantages of conventional spatial displays. For this purpose, the benefits of an egocentric perspective view shall be realized on a global level by expanding the horizontal field of view to 360 degrees to a panoramic view. Thus, additional views to generate global situation awareness are rendered obsolete.

Based on a domain specific task analysis, representative cockpit tasks are identified. After conducting some thorough analysis of the properties of the panoramic view, two tasks were prioritized. As part of the comparative evaluations, the performance of test persons using the novel display concept is compared with that of the two conventional displays. The conventional displays cover a two-dimensional and an exocentric view. The data collection is carried out with test persons with extensive flight experience, including Airbus test pilots, former pilots of the German Air Force as well as weapon system engineers.

Both investigations indicate performance differences by using the different spatial displays. Contrary to the expectations, the developed panoramic display cannot be recommended for one of the two investigated tasks. The side to side comparison between the panoramic display and the two dimensional display shows benefits of the panoramic display. However, in comparison with the exocentric display the panoramic display doesn't show superiority.

The reason for the performance deficit can substantially be explained with two effects; the hemisphere effect and the trajectory transforming. The hemisphere effect is the phenomenon that the understanding of object positions in the rear hemisphere of a perspective display requires more cognitive resources than the understanding of object positions in the front hemisphere. The trajectory transformation characterizes the particularity of the panoramic display, to transform the curvature of trajectories in a matter of which the operator is unfamiliar. The impacts of additional training to reduce these effects were not evaluated.

Although accepted by the test personnel, the usage of the novel spatial display in aircraft cannot be recommended. However, the potential for other uses cases, in particular in the range of the integration of sensor images, or as assistance display, can be rated high. These potential applications could be the object of future research efforts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Diagrammverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Ziele der Arbeit	2
1.3. Aufbau der Arbeit	2
2. Informationsdarstellung im Flugzeugcockpit	5
2.1. Informationsbedarf	5
2.1.1. Raumzustandsgrößen	6
2.1.2. Referenzierung von Raumzustandsgrößen	6
2.2. Technologien zur Informationsdarbietung	7
2.2.1. Head Down Displays	8
2.2.2. Großflächendisplays	9
2.2.3. Synthetische Sichtsysteme	10
2.3. Mathematische und Physikalische Grundlagen	11
2.3.1. Lineare und perspektivische Projektionen	12
2.3.2. Nichtlineare Projektionen	14
2.3.3. Darstellungsparameter	16
2.3.4. Transformation der gekrümmten Erdoberfläche zu einer planaren Ebene	18
2.4. Psychologische und physiologische Aspekte	20
2.4.1. Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess	20
2.4.2. Visuelle Informationsaufnahme	21
2.4.3. Wahrnehmung räumlicher Tiefe	22
2.4.4. Situationsbewusstsein	23
2.5. Wissenschaftliche Untersuchungen zu räumlichen Darstellungen	26
2.5.1. Displaygröße	26
2.5.2. Dimension	26
2.5.3. Bezugssystem	28
2.5.4. Größe des Blickfeldes	33
2.5.5. Gestaltung von Tiefenschlüsseln	34
2.5.6. Gestaltung von Objektsymbolen	35
2.6. Beschreibung des Anwendungsfalls	35
2.7. Eignung und Defizite konventioneller Displayformate	38
2.8. Panoramen	40
3. Konzeption eines großflächigen Panoramaformats	41
3.1. Integration des Großflächendisplays in ein Flugzeugcockpit	41
3.1.1. Auswahl des Flugzeugmusters	42
3.1.2. Geometrische Rahmenbedingungen	42
3.1.3. Anzeige- und Bedienkonzept	44
3.2. Designaspekte des neuartigen Raumformats	45
3.2.1. Projektionsart	46
3.2.2. Projektionsbezugssystem	47
3.2.3. Tiefenschlüssel und Subskalen	49
3.2.4. Grafische Gestaltung	50
3.2.5. Variable Projektionsparameter	51
3.3. Designentwurf des Panoramaformats	53

3.4.	Besonderheiten der Darstellung.....	55
3.4.1.	Geometrische Aspekte	55
3.4.2.	Dynamische Aspekte.....	57
3.4.3.	Hemisphäreneffekt	57
3.5.	Hypothesen	58
4.	Versuch 1: Evaluation des Positionsverständnisses	64
4.1.	Methodik zur Ermittlung von erweitertem Raumbewusstsein.....	64
4.1.1.	Leistungsmessung	64
4.1.2.	Subjektiv erlebtes Raumbewusstsein	65
4.1.3.	Weitere Erhebungen.....	66
4.2.	Erstellung der Versuchsszenarien	66
4.3.	Beschreibung der Raumformate	67
4.3.1.	Zweidimensionales, koplanares Format	69
4.3.2.	Exozentrisches, gebundenes Format	70
4.3.3.	Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat.....	71
4.4.	Datenerhebung.....	72
4.5.	Versuchsplan	72
4.6.	Versuchsumgebung	73
4.6.1.	Versuchshardware	74
4.6.2.	Versuchssoftware und Datentypen.....	74
4.7.	Versuchsablauf	76
4.8.	Auswahl der Versuchsteilnehmer	77
4.9.	Durchführung	78
5.	Versuch 1: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung.....	79
5.1.	Beschreibung der Stichprobe	79
5.2.	Datenanalyse.....	79
5.3.	Versuchsergebnisse	80
5.3.1.	Datenmenge und Datenintegrität.....	80
5.3.2.	Objektive Leistungsdaten – Haupteffekte	80
5.3.3.	Objektive Leistungsdaten – Interaktionen 1. Ordnung.....	83
5.3.4.	Subjektive Daten.....	86
5.4.	Diskussion	88
5.5.	Hypothesenprüfung	91
6.	Versuch 2: Evaluation der Konflikterkennung.....	97
6.1.	Methodik zur Ermittlung von erweitertem Raumbewusstsein.....	97
6.1.1.	Leistungsmessung	97
6.1.2.	Subjektiv erlebtes Raumbewusstsein	98
6.1.3.	Weitere Erhebungen.....	98
6.2.	Erstellung der Versuchsszenarien.....	98
6.3.	Beschreibung der Raumformate	99
6.3.1.	Zweidimensionales, koplanares Format	100
6.3.2.	Exozentrisches, gebundenes Format	100
6.3.3.	Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat.....	101
6.4.	Auswahl und Beschreibung der Zusatzaufgaben	102
6.4.1.	Visuelle Wahrnehmung.....	102
6.4.2.	Abruf von Informationselementen	103
6.4.3.	Kognitive Manipulation	103
6.5.	Datenerhebung.....	104
6.6.	Versuchsplan	104
6.7.	Versuchsumgebung	106
6.7.1.	Versuchshardware	106
6.7.2.	Versuchssoftware und Datentypen.....	107
6.8.	Versuchsablauf	109
6.9.	Auswahl der Versuchsteilnehmer	110
6.10.	Durchführung	110

7.	Versuch 2: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung.....	111
7.1.	Beschreibung der Stichprobe	111
7.2.	Datenanalyse.....	111
7.3.	Versuchsergebnisse	111
7.3.1.	Datenmenge und Datenintegrität.....	112
7.3.2.	Objektive Leistungsdaten Hauptaufgabe – Haupteffekte	112
7.3.3.	Objektive Leistungsdaten Hauptaufgabe – Interaktionen 1. Ordnung.....	115
7.3.4.	Objektive Leistungsdaten Zusatzaufgabe.....	116
7.3.5.	Objektive Leistungsdaten der Haupt- und Zusatzaufgabe	118
7.3.6.	Subjektive Daten.....	119
7.4.	Diskussion	121
7.5.	Hypothesenprüfung	127
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
	Literaturverzeichnis	136
	Anhang A – Mathematische Herleitungen	143
	Anhang B – Fragebögen.....	145
	Anhang C – Eingabemasken Sequenz 1. Versuch.....	146
	Anhang D – Ergebnistabellen 1. Versuch	148
	Anhang E – Ergebnistabellen 2. Versuch.....	150
	Anhang F – Hierarchische Task Analyse	152

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Freiräume (violett) zwischen einzelnen Displayeinheiten im A400M Cockpit [29].....	10
Abb. 2-2:	Ebene geometrische Projektionen nach Carlbom [41]	12
Abb. 2-3:	Prinzip der Zylinderprojektion	15
Abb. 2-4:	Prinzip der Kugelprojektion	16
Abb. 2-5:	Visualisierung verschiedener Bezugssysteme	17
Abb. 2-6:	Visualisierung eines kleinen (links) und eines großen (rechts) Abbildungsausschnittes einer orthografischen Parallelprojektion	18
Abb. 2-7:	Korrektur der vertikalen Entfernung und des Elevationswinkels.....	19
Abb. 2-8:	Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung [7]	21
Abb. 2-9:	Visualisierung der grafischen Tiefenschlüssel Verdecken von Objekten (1), gewohnte Größe von Gegenständen (2) und linearperspektivische Skalierung (3, sichtbar durch Konvergenz der Gitternetzlinien)	23
Abb. 2-10:	Entscheidungsbildungsprozess [63]	25
Abb. 2-11:	Inside Out Display – egozentrische Darstellung	28
Abb. 2-12:	Outside In Display – weltreferenzierte Darstellung	28
Abb. 2-13:	Bezugsrahmen von Kartendisplays	29
Abb. 2-14:	Perspektivische Darstellung der horizontalen und vertikalen Ablagen von einer Solltrajektorie	31
Abb. 2-15:	Darstellung von egozentrischen Relativpositionen	32
Abb. 2-16:	Geometrische Blickfelder.....	33
Abb. 2-17:	Synthetische Tiefenschlüssel.....	35
Abb. 2-18:	Beispiele für egozentrische und exozentrische Relationen: 1.) Externes Objekt – Eigenes Objekt, 2.) Externes Objekt – Egozentrischer Luftraum, 3.) Externes Objekt – Externes Objekt, 4.) Externes Objekt – Exozentrischer Luftraum	37
Abb. 2-19:	Konventionelle Raumformate	39
Abb. 3-1:	Konventionelle Konfiguration mit 3 MFDs und HUP – Displayfläche 696 cm ² [124]	43
Abb. 3-2:	Neue Konfiguration mit Großflächendisplay – Displayfläche 1302 cm ²	43
Abb. 3-3:	Geometrische Anordnung des Großflächendisplays bezüglich des DEPs [124]	44
Abb. 3-4:	Verlauf der Horizontlinie bei Verwendung einer sphärischen Zentralprojektion in Abhängigkeit der Fluglagewinkel Θ_{AC} und Φ_{AC} (Abstand zum Boden beträgt 0 m)	48
Abb. 3-5:	Darstellung der sphärischen Panoramaprojektion mit verschiedenen Bezugssystemen	49
Abb. 3-6:	Darstellung eines kartesischen und eines polaren Referenzgitters mit einer sphärischen Zentralprojektion	50
Abb. 3-7:	VFOV als Projektionsparameter (oben 180°, unten 90°)	51
Abb. 3-8:	Kamerahöhe als inhärenter Projektionsparameter (oben große Höhe, unten niedrige Höhe)	52
Abb. 3-9:	Vertikale Ausrichtung des Projektionszentrums (oben 0°, unten -15°).....	53
Abb. 3-10:	Designentwurf der Panoramaansicht mit Flugführungshilfe.....	53
Abb. 3-11:	Versuchsaufbau – Transfer der erfassten Azimutwerte in reale Raumrichtungen [eigene Bildquelle]	56
Abb. 3-12:	Erscheinungsbild von Hauptfluchtlinien, die parallel zu den Raumhauptachsen 1 (x-Achse) und 2 (y-Achse) angeordnet sind und einen vertikalen Abstand h von 30 000 ft zum Projektionszentrum aufweisen. Der horizontale Abstand zwischen benachbarten parallelen Linien beträgt jeweils D = 5 NM (Anhang A – Mathematische Herleitung)	56
Abb. 3-13:	Visualisierung von Vertikalgeschwindigkeiten.....	57
Abb. 3-14:	Übersicht über die Kategorisierung von Situationsbewusstsein und Ableitung der Untersuchungen.....	60
Abb. 3-15:	Übersicht über die hierarchische Dekomposition der Zentralhypothesen in die zugehörigen Einzelhypothesen.....	63
Abb. 4-1:	Zweidimensionales, koplanares Format (kontrastoptimierte Abbildung)	69
Abb. 4-2:	Exozentrisches, gebundenes Format (kontrastoptimierte Abbildung).....	70
Abb. 4-3:	Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat (kontrastoptimierte Abbildung)	71
Abb. 4-4:	Antwortmaske: Höhenskala aktiv (kontrastoptimierte Abbildung).....	72

Abb. 4-5:	Mock-Up zur Durchführung der Versuche [eigene Bildquelle]	74
Abb. 4-6:	Informationsflussdiagramm der Versuchssoftware	76
Abb. 4-7:	Versuchsablaufplan	77
Abb. 6-1:	Zweidimensionales, koplanares Format - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)	100
Abb. 6-2:	Exozentrisches, gebundenes Format - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)	101
Abb. 6-3:	Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)	101
Abb. 6-4:	Gruppenkonforme Konfiguration	103
Abb. 6-5:	Konfiguration mit Abweichter	103
Abb. 6-6:	Darstellung der visuellen Gedächtnisaufgabe	103
Abb. 6-7:	Identische Volumenkörper [164]	104
Abb. 6-8:	Verschiedene Volumenkörper [164]	104
Abb. 6-9:	Modifiziertes Numpad [eigene Bildquelle]	106
Abb. 6-10:	Konventionelle PC Mouse [eigene Bildquelle]	106
Abb. 6-11:	Informationsflussdiagramm	108
Abb. 6-12:	Versuchsablaufplan	110
Abb. 7-1:	Objektbewegungsspuren eines typischen Szenarios dargestellt in der Draufsicht der zweidimensionalen Ansicht und in der Panoramaansicht	122

Diagrammverzeichnis

Diagr. 1-1: Aufbau der Arbeit	4
Diagr. 3-1: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit (Angabe in Mittelwert/Standardfehler) in der Dimension Azimut für Objekte der vorderen und der hinteren Hemisphäre unter Verwendung eines polares Referenzgitters	58
Diagr. 4-1: Flugleistungshüllkurve Höhe über Machzahl am Beispiel des Eurofighters [157]	67
Diagr. 5-1: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	81
Diagr. 5-2: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Objektanzahl (OA).....	82
Diagr. 5-3: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Fragentyp (FT).....	82
Diagr. 5-4: Wiedergabefehler für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Objektanzahl (OA).....	83
Diagr. 5-5: Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Objektanzahl (OA).....	84
Diagr. 5-6: Wiedergabefehler für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit des Fragentyps (FT)	85
Diagr. 5-7: Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit des Fragentyps (FT)	85
Diagr. 5-8: NASA TLX für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	86
Diagr. 5-9: SART für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	87
Diagr. 5-10: Subjektive Rangfolge bezüglich der Eignung des Raumformats (RF) für die zu bearbeitende Aufgabe	87
Diagr. 7-1: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	112
Diagr. 7-2: Absolute Häufigkeit der einzelnen Fehlertypen (FT)	113
Diagr. 7-3: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Art der Zusatzaufgabe (ZA).....	114
Diagr. 7-4: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Schwierigkeit (SW).....	114
Diagr. 7-5: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Zusatzaufgabe (ZA)	115
Diagr. 7-6: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Schwierigkeit (SW).....	116
Diagr. 7-7: Fehlerrate der Zusatzaufgabe für den Faktor Art der Zusatzaufgabe (ZA)	117
Diagr. 7-8: Fehlerrate der Zusatzaufgabe für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Art der Zusatzaufgabe (ZA).....	117
Diagr. 7-9: Fehlerrate der Hauptaufgabe (HA) und der Zusatzaufgabe (ZA) bei isolierter und kombinierter Aufgabenbearbeitung für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	119
Diagr. 7-10: NASA TLX für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	120
Diagr. 7-11: SART für den Hauptfaktor Raumformat (RF)	120
Diagr. 7-12: Subjektive Rangfolge bezüglich der Eignung des Raumformats (RF) für die zu bearbeitende Aufgabe	121
Diagr. 7-13: Subjektive Rangfolge bezüglich der wahrgenommenen Schwierigkeit der Zusatzaufgabe (ZA)	121

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Grafische Tiefenschlüssel [50]	22
Tab. 2-2:	Informationsgruppen zur Generierung von Raumbewusstsein	37
Tab. 2-3:	Defizite konventioneller Displaykonfigurationen.....	40
Tab. 3-1:	Informationselemente zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen	45
Tab. 4-1:	Versuchsplan 1. Versuch	73
Tab. 5-1:	Deklaration der dreiwertigen Logik zur Prüfung der Hypothesen.....	92
Tab. 5-2:	Logiktable H 1.1)	92
Tab. 5-3:	Logiktable H 1.1 a)	93
Tab. 5-4:	Logiktable H 1.1 b)	94
Tab. 5-5:	Logiktable H 1.2)	95
Tab. 5-6:	Logiktable H 1.3)	95
Tab. 5-7:	Logiktable ZH 1).....	96
Tab. 6-1:	Versuchsplan 2. Versuch	105
Tab. 7-1:	Logiktable H 2.1)	127
Tab. 7-2:	Logiktable H 2.1 a)	127
Tab. 7-3:	Logiktable H 2.1 b).....	128
Tab. 7-4:	Logiktable H 2.2)	128
Tab. 7-5:	Logiktable H 2.3)	129
Tab. 7-6:	Logiktable H 2.4)	129
Tab. 7-7:	Logiktable ZH 2).....	130
Tab. 8-1:	Vor- und Nachteile der untersuchten Raumformate	134

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
CDTI	Cockpit Display Traffic Information
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
CRS	Coordinate Reference System
CRT	Cathode Ray Tube
DASS	Defensive Aids Subsystem
DEP	Design Eye Point
dpi	Dots per Inch
ECEF	Earth Centred Earth Fixed
ERP	Eye Reference Point
EVS	Enhanced Vision System
EXO	Exozentrische Ansicht
ft	Feet
GB	Giga Byte
GFOV	Geometric Field of View
GUI	Graphical User Interface
GUS	(ehemalige) Gemeinschaft unabhängiger Sowjetstaaten
HD	Heading Down
HDD	Head Down Display
HMD	Helmet Mounted Display
HolDis	Holographic Display
HOTAS	Hands on Throttle and Stick
HTA	Hierarchical Task Analysis
HUD	Head-Up Display
HUP	Head-Up Panel
IDE	Integrated Development Environment
IFR	Instrumented Flight Rule
kn	Knots
LAD	Large Area Display
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
Ma	Machzahl
MFD	Multifunction Display
min	Minuten
MLS	Microwave Landing System
MR	Mentale Rotationsaufgabe
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Navigation Display
NED	North East Down
NM	Nautical Mile
NN	Normal Null
PAN	Panoramaformat
PCCADS	Panoramic Cockpit Control and Display System
PFD	Primary Flight Display
PPI	Present Position Indicator
RADAR	Radio Detecting and Ranging
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SART	Situation Awareness Rating Technique
SVS	Synthetic Vision System
TLX	Task Load Index
VG	Visuelle Gedächtnisaufgabe
VS	Visuelle Suchaufgabe
VSD	Vertical Situation Display
VFR	Visual Flight Rules
WGS84	World Geodetic System
WSO	Waffensystemoffizier
WTD	Wehrtechnische Dienststelle

1. Einleitung

In Zeiten der Globalisierung stellen Flugzeuge einen der wichtigsten Eckpfeiler unserer Infrastruktur dar. Ihre Eigenschaft, große Entfernungen zeitminimal zu überwinden, bescherte dem Luftverkehr von den 50er Jahren bis heute stetige und sogar exponentielle Wachstumszahlen [1]. Voraussetzung dafür waren zahlreiche technologische Entwicklungen, durch die das Flugzeug zu einer der effizientesten und sichersten Verkehrsmittel wurde. Besonders gut sichtbar sind die Neuerungen unter anderem an der Mensch-Maschine Schnittstelle, dem Flugzeugcockpit. Diesem kommt als zentrale Kommunikationsschnittstelle zwischen Pilot und Flugzeug eine ganz besondere Bedeutung zu, da die Gestaltung von Bedien- und Anzeigegeräten maßgeblich Einfluss auf die Pilotenleistung hat. Es stellt eine hochkomplexe Arbeitsumgebung dar, die optimal an die Bedürfnisse des Piloten anzupassen ist.

Dies gilt vor allem in Bezug auf die Darbietung von Informationen. Wie auch in anderen Domänen unseres täglichen Lebens, werden in dem hochautomatisierten System „Flugzeug“ inzwischen enorme Mengen von Daten generiert. Sie werden gefiltert, aufbereitet und integriert, bevor sie dem Piloten auf konfigurierbaren Anzeigegeräten des Glascockpits dargeboten werden. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang nicht nur die Frage, welche Informationen wann von Interesse sind, sondern auch wie sie möglichst verständlich vermittelt werden. Eine gut verständliche Darstellung ist schließlich Voraussetzung, um ein korrektes Situationsbewusstsein des Piloten zu generieren. Korrektes Situationsbewusstsein wird wiederum als essentielle Grundlage betrachtet, richtige Entscheidungen zu treffen und passende Handlungen auszuwählen [2].

Obgleich diese Thematik bereits in einer Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen aufgegriffen wurde, ist der Forschungsbedarf ungebrochen groß. Die vorliegende Arbeit hat daher das Ziel, einen wissenschaftlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Mensch-Maschine Schnittstelle im Flugzeugcockpit zu leisten. Im Folgenden wird die Motivation, sich mit diesem Thema zu beschäftigen, genauer erläutert und es werden die Ziele und der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

1.1. Motivation

Statistiken der vergangenen Jahrzehnte zeigen, dass bei ca. 70 - 80 % aller Unfälle „Human Error“ als Hauptursache oder zumindest als beitragender Faktor zu nennen ist [3]. Davon sind circa 88 % auf mangelndes Situationsbewusstsein zurückzuführen [4]. Bei zwei von drei Unfällen kann also unzureichendes Situationsbewusstsein als eine Fehlerquelle genannt werden. Welchen Anteil dabei ein schlechtes Displaydesign hat, kann nur spekuliert werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Zahlen durch zusätzliche Designverbesserungen der Mensch-Maschine Schnittstelle deutlich gesenkt werden könnten. Während sich die Häufigkeit von Unfällen infolge technischer Defekte in den zurückliegenden Dekaden um ein Vielfaches reduziert hat, sind die Fortschritte bei der Vermeidung von Human Errors vergleichsweise überschaubar. Das heißt, die Quote der durch Human Error bedingten Unfälle ist in etwa konstant. In diesem Bereich besteht verstärkter Handlungsbedarf.

Es ist daher wichtig, das bestehende Cockpitdesign regelmäßig zu hinterfragen und an neue Funktionalitäten sowie geänderte Rahmenbedingungen anzupassen. In diesem Zusammenhang sind auch technologische Neuerungen zu berücksichtigen, die es heute ermöglichen, einzelne Displays durch eine einzige, großflächige Displayeinheit im Hauptinstrumentenbrett zu ersetzen. Die Idee eines solchen Displays ist dabei nicht neu. Bereits Ende der achtziger Jahre stellte Adam [5] ein Cockpitkonzept vor, das die Verwendung eines großflächigen Displays vorsah. Eine Umsetzung scheiterte damals jedoch an der Problematik der technologischen Realisierung.

Die Vorteile einer großflächigen Displaykonfiguration liegen auf der Hand. Zum einen führt die zusammenhängende Displayfläche zu einer Vergrößerung der Nettodisplayfläche, weshalb es aus informationsergonomischer Sicht möglich ist, mehr Informationen darzustellen. Zum anderen erlaubt die durch die frei konfigurierbare Displayfläche gewonnene Flexibilität eine kontextgerechte Integration von Informationen. Die zentrale Frage, die es nun zu beantworten gilt, ist, wie man diese Vorteile für ein neuartiges, integriertes Darstellungskonzept nutzen kann, um das Situationsbewusstsein

des Piloten zu verbessern und somit zu einer Steigerung der menschlichen Leistungsfähigkeit und einer Reduktion menschlicher Fehler beizutragen.

Auf der Suche nach einer Antwort auf diese Frage muss man sich vor Augen halten, dass die Aufgaben des Piloten komplex und vielfältig sind. Die Reduktion des Cockpitpersonals auf zwei Piloten in der zivilen und auf einen Pilot in der militärischen Luftfahrt führte dazu, dass in kritischen Flugphasen noch mehr Aufgaben von einer Person simultan zu bearbeiten sind. Dies muss bei der Gestaltung von Anzeigeelementen berücksichtigt werden. Informationen sollen dabei gut ablesbar, verständlich und integriert vorliegen. Visuelle und kognitive Überanstrengung des Operators sind zu verhindern.

Als übergeordnetes Ziel gilt es daher, eine adäquate Arbeitsbelastung des Piloten zu generieren und gleichzeitig sein Situationsbewusstsein zu steigern. Dem Raumbewusstsein, also dem Bewusstsein über die Raum-Zeit Dynamik des eigenen Fluggerätes und anderer Objekte, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Konventionelle Raumformate zeichnen sich dadurch aus, dass sie Raumbewusstsein entweder hinsichtlich der primären Flugführungsaufgabe oder hinsichtlich der Vermittlung von Objektrelationen auf globaler Ebene unterstützen. Eine Anzeige, die beides gleichermaßen unterstützt, existiert bis dato nicht.

Im Rahmen des „Panoramic Display Projektes“ wird bei Airbus Defence and Space in Manching seit knapp zehn Jahren an der Konzeptentwicklung zur Integration eines Großflächendisplays in ein hochagiles Flugzeug geforscht [6]. Ein wesentlicher Bestandteil der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung und Evaluierung eines neuartigen Raumformates zur Unterstützung von Situationsbewusstsein. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieses Vorhabens werden in dieser Arbeit detailliert beschrieben.

1.2. Ziele der Arbeit

Die in dieser Arbeit beschriebene Forschungstätigkeit verfolgt zwei wesentliche Ziele. Das erste Ziel umfasst die Entwicklung eines neuartigen Formats zur Darstellung von Rauminformationen für Piloten. Den Defiziten konventioneller Darstellungen, insbesondere hinsichtlich der Generierung von Situationsbewusstsein, soll dabei durch ein alternatives Konzept begegnet werden, welches neben einer großen Darstellungsfläche einen hohen Grad an integrierten Informationen aufweist. Sowohl visuelle als auch kognitive Ressourcen des Piloten sollen auf diese Art geschont werden, um nicht zuletzt seine Leistungsfähigkeit zu maximieren. In diesem Zusammenhang sollen neben den im Cockpit herrschenden Rahmenbedingungen auch jüngste technologische Neuentwicklungen berücksichtigt werden.

Das zweite Ziel besteht darin, die Eignung des entwickelten Konzepts für repräsentative Cockpit-anwendungen abzuschätzen. Es soll eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, die empfehlende oder nicht empfehlende Aussagen bezüglich eines Einsatzes im Cockpit erlaubt. Dabei sollen Forschungshypothesen abgeleitet und in einem zweistufigen Versuchsplan geprüft werden. In beiden Einzelversuchen soll das entwickelte Raumformat einem Vergleich mit konventionellen, bewährten Darstellungen unterzogen werden. Als Vergleichsgrundlage dienen neben objektiv erhobenen Leistungsdaten auch subjektive Parameter, die Rückschlüsse hinsichtlich des generierten Situationsbewusstseins und der erlebten Arbeitsbelastung ermöglichen.

1.3. Aufbau der Arbeit

Im folgenden zweiten Kapitel werden theoretische Grundlagen betrachtet. Diese umfassen neben einer Beschreibung des Informationsbedarfs im Cockpit auch relevante Displaytechnologien. Des Weiteren werden mathematische und physikalische Grundlagen zur Darstellung von Rauminformationen beschrieben sowie physiologische und psychologische Aspekte bei der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen erklärt. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die visuelle Informationsaufnahme und die Rolle von Situationsbewusstsein gelegt. Zudem wird der Stand der Forschung bezüglich der Eignung und Defizite verschiedener Raumformate als Cockpitanzeigen zusammengefasst und der Anwendungsfall beschrieben, mit dem die Motivation der Entwicklung eines neuen Raumformates

begründet wird. Abschließend wird erklärt, warum das neuartige Raumformat auf einer Panoramadarstellung basieren soll.

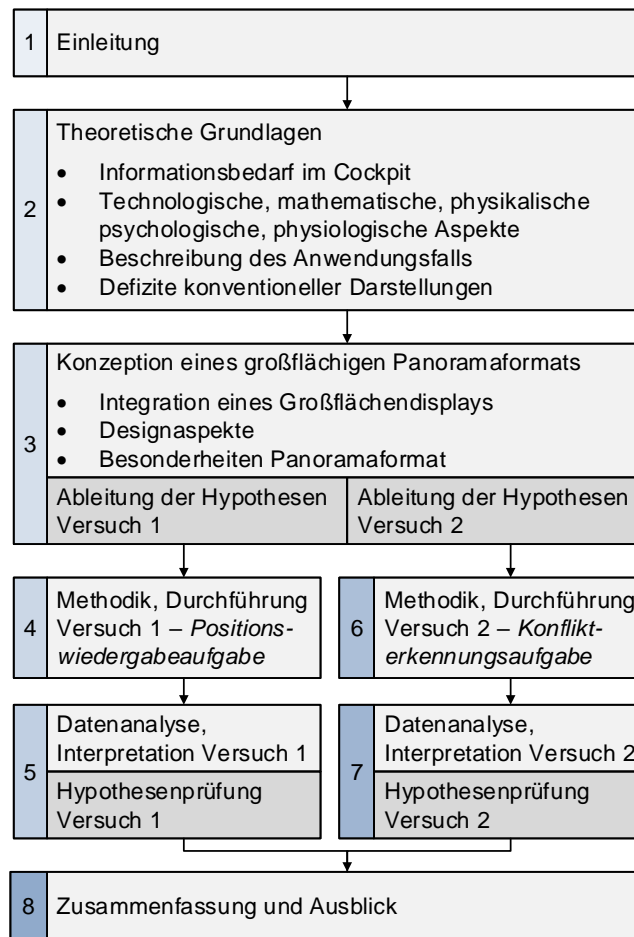
Im dritten Kapitel wird am Beispiel eines hochagilen Flugzeuges ein mögliches Konzept zur geometrischen Integration eines Großflächendisplays vorgestellt. Anschließend wird das Darstellungskonzept des neuartigen Raumformates entwickelt. Basierend auf einer Analyse der Besonderheiten der Darstellung werden für zwei repräsentative Cockpittätigkeiten Forschungshypothesen abgeleitet, deren Prüfung Gegenstand der folgenden Kapitel ist. Die Cockpittätigkeiten umfassen eine Positionswiedergabeaufgabe, bei der aktuelle und zukünftige Positionen dynamischer Objekte wiederzugeben sind, und eine Konflikterkennungsaufgabe, bei der abzuschätzen ist, ob dynamische Objekte zukünftig in einen Luftraum fliegen oder nicht. Die Ergebnisse beider Aufgaben erlauben Rückschlüsse auf das mit dem jeweiligen Raumformat generierte Situationsbewusstsein der Piloten.

In Kapitel vier und Kapitel sechs wird jeweils die Methodik der Untersuchungen vorgestellt, die zur Hypothesenprüfung dient. Im Konkreten wird dabei auf die Versuchsszenarien, die zu vergleichenden Raumformate, die Datenerhebung, die Versuchsumgebung und den Versuchsablauf eingegangen. Außerdem wird die Auswahl der Teilnehmer begründet und die Durchführung beschrieben.

Die zu den in Kapitel vier und sechs gehörenden Versuchsergebnisse werden in Kapitel fünf und sieben dargelegt. Diese umfassen jeweils eine Beschreibung der Stichprobe, die Datenanalyse sowie die Interpretation und Visualisierung der erhobenen Daten. Nach einer Diskussion der erzielten Ergebnisse werden die in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen geprüft, indem die Einzelergebnisse mit logischen Operatoren verknüpft werden.

Mit einer Zusammenfassung des Forschungsvorgehens und der erlangten Erkenntnisse bildet Kapitel acht den Abschluss dieser Arbeit. Dabei wird das Potenzial des entwickelten Raumformates diskutiert und weiterer Forschungsbedarf aufgedeckt. Zudem werden alternative Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

Eine übersichtliche Visualisierung der Gliederung ist in Diagr. 1-1 dargestellt.



Diagr. 1-1: Aufbau der Arbeit

2. Informationsdarstellung im Flugzeugcockpit

Die sichere Führung eines Luftfahrzeugs kann sowohl in der zivilen als auch militärischen Fliegerei als wichtigstes Ziel betrachtet werden. Sie ist die Grundvoraussetzung für die Erreichung aller untergeordneten Ziele, wie beispielsweise dem zeit- und verbrauchsminimalen Transfer von Passagieren oder der Sicherung von Hoheitsgebieten. Zur Gewährleistung eines sicheren Fluges sind fundierte Kenntnisse des Piloten über die aktuellen Zustände seines Fluggerätes und anderer Objekte nötig.

Moderne Avioniksysteme sammeln mit Hilfe bordinterner Sensoren eine Fülle an Daten. Die Funkkommunikation erlaubt es heute zudem, auf bordexterne Sensoren als Informationsquelle zurückzugreifen. Computer verifizieren diese Daten hinsichtlich Plausibilität, fusionieren Daten verschiedener Quellen und verarbeiten die Ergebnisse zu integrierten Informationen. Displays vermitteln die Informationen schließlich dem Piloten. Er nimmt sie dabei über seine Sinnesorgane wahr, verarbeitet sie und nutzt sie als Grundlage, um Entscheidungen für sein Handeln zu treffen [7]. Die Qualität der getroffenen Entscheidungen hängt dabei maßgeblich von seinem mentalen Bild über die aktuelle Situation ab. Dieses wird auch unter dem Begriff Situationsbewusstsein zusammengefasst [2]. Gutes Displaydesign muss daher die Generierung und Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins im operativen Flugbetrieb unterstützen [8].

In diesem Kapitel werden wichtige Aspekte der Informationsdarstellung im Flugzeugcockpit erläutert. Die technologischen Rahmenbedingungen werden beschrieben und verschiedene Möglichkeiten der Darstellung räumlicher Informationen vorgestellt. Die dazu notwendigen mathematischen und physikalischen Grundlagen werden erklärt. Ferner werden physiologische Aspekte der visuellen Wahrnehmung sowie psychologische Aspekte der Informationsverarbeitung betrachtet und der Stand der Forschung bezüglich der Leistungsfähigkeit verschiedener Raumformate zusammengefasst. Nach der Beschreibung des Anwendungsfalls und der Ableitung der benötigten Informationsgruppen werden Eignung und Defizite konventioneller Darstellungen in Bezug auf die Generierung von Raumbewusstsein beschrieben. Zur Begegnung der identifizierten Defizite wird abschließend als Lösungsvorschlag die Idee einer panoramaartigen Darstellung vorgestellt.

2.1. Informationsbedarf

Wir leben heute im sogenannten Informationszeitalter, dessen eigentliche Herausforderung nicht mehr in der Beschaffung relevanter Informationen, sondern vielmehr in der Extraktion wichtiger Informationselemente aus einer vorhandenen Datenflut besteht [8]. Begründet werden kann dies mit der Zunahme der Komplexität und der Vernetzung unserer Umwelt, welche eine immer größere Fülle an Daten erzeugt. Dieser Trend ist in der Luftfahrt besonders stark ausgeprägt.

Die Aufgaben eines Piloten sind äußerst vielfältig. Dementsprechend umfassend ist sein Informationsbedarf. Zu erwähnen sind dabei an erster Stelle flugdynamische Größen, die den Flugzustand des eigenen Fluggerätes beschreiben. Deren Kenntnis ist zwingende Voraussetzung, um das Flugzeug innerhalb der zulässigen Betriebsbedingungen kontrolliert zu fliegen. Da der Pilot dabei als regelndes Element agiert [9], müssen Parameter wie Geschwindigkeit, Fluglage und Höhe von ihm kontinuierlich abgelesen und überprüft werden. Beim Flug nach Sichtregeln (VFR) dient der Blick durch das Cockpitfenster als Informationsquelle, wohingegen beim Flug nach Instrumentenregeln (IFR), wie sie in der kommerziellen Fliegerei üblich sind, auf Cockpitanzeigen zurückgegriffen wird.

Um das Fluggerät im dreidimensionalen Raum zu einem Ziel zu manövrieren, muss der Pilot sowohl die Positionskoordinaten des Zielortes als auch seine aktuellen Positionskoordinaten kennen. Die Planung einer Flugroute setzt dabei die Kenntnis zusätzlicher Informationen über den Routenverlauf voraus. Dies betrifft meteorologische Aspekte, wie die mögliche Präsenz von Gewitterzellen gleichermaßen wie topografische Aspekte, die zum Beispiel den Verlauf der Erdoberfläche umfassen. Ferner sind Kenntnisse über die Positionskoordinaten von Weg- und Routenpunkten, Funkfeuer, Ausweichflughäfen und anderer fliegender Objekte, sowie der Verlauf von Luftstraßen und Lufträumen Voraussetzung, um ein Flugzeug sicher zum Zielort zu navigieren.

2.1.1. Raumzustandsgrößen

Informationen, die zur Bearbeitung von Aufgaben mit einem Raum-Zeit Bezug notwendig sind, lassen sich in der Kategorie der **Raumzustandsgrößen** zusammenfassen. Raumzustandsgrößen beschreiben zeitabhängige, vektorielle Größen im dreidimensionalen Raum, welche die eigene Flugdynamik oder die Flugdynamik anderer Objekte eindeutig wiedergeben. Im Kontext der flugdynamischen Systembeschreibung werden darunter:

- geografische Positionen (geografische Breite, geografische Länge, Höhe über NN),
- translatorische Geschwindigkeiten (Geschwindigkeit, Steigwinkel, Bahn-Azimutwinkel),
- Fluglagewinkel (Nickwinkel, Rollwinkel, Azimutwinkel)
- und rotatorische Geschwindigkeiten (Nickrate, Rollrate, Gierrate)

verstanden. Insgesamt existieren für einen Starrkörper somit zwölf verschiedene Raumzustandsgrößen. Die Kopplung der Parameter untereinander erfolgt über Bewegungsdifferentialgleichungen [10].

Neben den Raumzustandsgrößen benötigen Piloten noch eine Vielzahl weiterer Informationen, die beispielsweise die Betriebszustände der eigenen Flugzeugsysteme betreffen oder bei militärischen Anwendungen auch taktischer Natur sein können. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich jedoch auf die Vermittlung von Raumzustandsgrößen konzentriert, da diese aufgrund ihrer Kopplung einen hohen Grad an Integration erfordern.

2.1.2. Referenzierung von Raumzustandsgrößen

Die eindeutige Beschreibung von Raumzustandsgrößen erfordert die Verwendung eines Koordinatenreferenzsystems (CRS). Ein CRS besteht aus einem Koordinatensystem und einem Bezugssystem [11]. Das Koordinatensystem stellt dabei eine Skala bereit, das Bezugssystem die Referenz für diese Skala.

2.1.2.1. Koordinatensysteme

Koordinatensysteme dienen der eindeutigen Beschreibung der Position von Punkten in einem geometrischen Raum [12]. Auf den Skalen der Koordinatenachsen sind Längen- oder Winkelmaße aufgetragen. Um das Erfassen der Werte einzelner Raumdimensionen zu erleichtern, verhalten sich die Koordinatenachsen meist orthogonal zueinander, d.h. ihre Basis ist orthogonal. Die Wahl der richtigen Skala hängt vom Anwendungskontext ab. Sollen Peilwinkel und absolute Entfernungen repräsentiert werden, ist ein polares Koordinatensystem zu verwenden. Sind Entfernungen entlang der Hauptachsen von Interesse, ist auf ein kartesisches Koordinatensystem zurückzugreifen. Die wichtigsten orthogonalen Koordinatensysteme sind im Folgenden aufgelistet [13]:

2D	-	kartesisch	(Längenskala, Längenskala)
	-	polar	(Längenskala, Winkelskala)
3D	-	kartesisch	(Längenskala, Längenskala, Längenskala)
	-	zylindrisch	(Längenskala, Winkelskala, Längenskala)
	-	sphärisch	(Längenskala, Winkelskala, Winkelskala)

2.1.2.2. Globale und lokale Bezugssysteme

Koordinatensysteme können an beliebigen Stellen im Raum positioniert und in beliebige Richtungen ausgerichtet werden. Um Rauminformationen mit Hilfe von Koordinaten eindeutig zu referenzieren, wird daher neben dem Koordinatensystem ein Bezugssystem benötigt.

Für globale Raumbetrachtungen eignen sich dabei Bezugssysteme mit Referenz auf den Erdkörper. Sie beziehen sich auf den Erdmittelpunkt (ECEF) oder die Erdoberfläche (WGS84 - Ellipsoid) und rotieren mit der Erdrotationsgeschwindigkeit [14].

Für lokale Betrachtungen ist die Wahl anderer Bezugssysteme sinnvoll, welche keinen oder nur einen Teilbezug zum Erdkörper besitzen. Das lokale North-East-Down (NED) Referenzsystem [14] wird beispielsweise an einer beliebigen Stelle im Raum positioniert. Die Ausrichtung der Koordinatenachsen erfolgt entlang der Erdhimmelsrichtungen Norden und Osten sowie in Richtung des Erdmittelpunkts. Bezogen auf die Erdoberfläche ist zwar seine Orientierung statisch, die Positionierung hingegen kann unabhängig vom Erdkörper erfolgen.

Ein weiteres lokales CRS ist das flugzeugfeste Attitude Heading Reference System [14]. Im Gegensatz zum NED-Referenzsystem wird dieses nicht nur unabhängig von der Position, sondern auch unabhängig von der Ausrichtung des Erdkörpers verwendet. Die Koordinatenachsen des flugzeugfesten Referenzsystems verhalten sich in der Regel kongruent zu den Flugzeugachsen. Der Koordinatensystemursprung befindet sich meist im Flugzeugschwerpunkt. Die Raumwinkel zwischen NED-Referenzsystem und flugzeugfesten Referenzsystem beschreiben die relative Fluglage, also Nick-, Roll- und Azimutwinkel des Fluggerätes.

2.1.2.3. Kombiniertes Bezugssystem

Werden Anforderungen an die Referenzierung von Rauminformationen durch ein konventionelles Referenzsystem nicht erfüllt, muss dieses angepasst werden. Die Anpassung kann durch die Kombination verschiedener CRS miteinander erfolgen. Das Heading-Down Referenzsystem (HD) ist ein solcher Hybrid. Es wird, ähnlich dem flugzeugfesten Referenzsystem, im Flugzeugschwerpunkt platziert. Die x-Achse des Koordinatensystems ist in Richtung des Flugzeugazimutwinkels ausgerichtet, die z-Achse zeigt wie beim NED-System Richtung Erdmittelpunkt. Die Richtung der y-Achse ergibt sich aus der Forderung der Orthogonalität aller drei Koordinatenachsen zueinander [13]. Anschaulich betrachtet handelt es sich beim HD-Referenzsystem also um ein NED-Referenzsystem, welches um den Azimutwinkel des Flugzeugs um die „Down“-Achse rotiert und in den Flugzeugschwerpunkt verschoben wurde.

2.2. Technologien zur Informationsdarbietung

Um dem Piloten Zugriff auf Informationen zu ermöglichen, müssen diese durch ein Ausgabegerät der Mensch-Maschine-Schnittstelle bereitgestellt werden. Im Cockpit eines Flugzeuges finden vor allem optische, aber auch akustische und haptische Ausgabegeräte Anwendung [15]. Der Vorteil optischer Darbietungen besteht unter anderem in der kontinuierlichen Bereitstellung [7] einer theoretisch unbegrenzten Informationsmenge. Dadurch ist es möglich auch komplexe Zusammenhänge verständlich abzubilden. Der Operateur kann durch das Lenken seines Blickes frei entscheiden, zu welchem Zeitpunkt er bestimmte Informationen abrufen. Werden viele ähnlich erscheinende Informationen gleichzeitig dargestellt, erfordert dies jedoch eine verstärkte visuelle Suchaktivität des Operators.

Besitzt ein Informationselement eine hohe Priorität, wird diese meist durch ein akustisches Ausgabegerät vermittelt. Akustische Ausgabegeräte haben einen stark aufmerksamkeitslenkenden Charakter, weil der auditive Sinneskanal im Vergleich zum visuellen nicht richtungsgebunden ist [7]. Die Wahrnehmung der jeweiligen Stimuli erfordert also keine Suchaktivitäten. Die Gefahr Informationen versehentlich zu überhören ist gering, weshalb sich akustische Darbietungen als sogenannte "Attention Getter" für Alarm- und Warndisplays eignen [15]. Aufgrund des transienten Charakters stehen die akustisch vermittelten Informationen nicht überdauernd zur Verfügung. Das Anwendungsfeld akustischer Darbietungen sind daher einfache Nachrichten mit Echtzeitbezug, die eine unmittelbare

Antwort erfordern. Aufgrund der erhöhten Geräuschkulisse im operativen Flugbetrieb und des transienten Charakters, werden akustische Darbietungen redundant zu visuellen Displays eingesetzt.

Haptische Ausgabegeräte können aktuell noch als Nischenanwendung bei der Informationsdarbietung im Cockpit betrachtet werden. In den letzten Jahren haben haptische Ausgabegeräte jedoch zunehmend das Interesse der Entwickler auf sich gezogen [15]. Der Vorteil dieser Darbietungsart besteht im richtungsgebundenen aufmerksamkeitslenkenden Charakter durch den mechanorezeptiven (kinästhetischen, propriozeptiven) Sinneskanal, der Signale unabhängig von Umgebungsgeräuschen oder Lichtverhältnissen wahrnimmt. Haptische Darbietungen eignen sich dadurch sehr gut zur Vermittlung räumlicher Informationen [16].

In den folgenden Unterkapiteln werden ausschließlich optische Ausgabegeräte thematisiert. Zum einen werden die Anzeigemedien des Head Down Displays und das Large Area Displays beschrieben und ihre Vorteile erläutert. Zum anderen wird mit dem synthetischen Sichtsystem ein ganzes Avioniksystem erklärt.

2.2.1. Head Down Displays

Der Begriff Head Down Display (HDD) beschreibt optische Displays, bei denen der Pilot zur Informationsaufnahme den Blick vom Cockpitfenster ab- und dem Cockpitinneren zuwenden muss. Sie werden primär in das Hauptinstrumentenbrett integriert und am sogenannten Eye Reference Point (ERP) ausgerichtet, um eine optimale Lesbarkeit sicherzustellen. In Form des primären Flugdisplays (PFD), des Navigationsdisplays (ND) oder eines Systemdisplays finden sie in vielen modernen Flugzeugen Anwendung.

HDDs unterstützen die Bildung von Situationsbewusstsein des Piloten [17], wohingegen andere Displaytypen, wie das Head Up oder das Helmet Mounted Display, die gesamte Komplexität typischer Luftverkehrs- oder taktischer Szenarien nur unvollständig wiedergeben [18]. Sie ergänzen die Sicht auf den Luftraum durch symbolische, piktorielle und alphanumerische Informationen, um die Interpretation der visuell wahrgenommenen Szenen zu erleichtern. HDDs sind daher eine unabdingbare Informationsquelle im Cockpit. Eine Gefahr bei der Interaktion mit HDDs stellt jedoch das sogenannte Tunneling der Aufmerksamkeit dar [17]. So kann es vorkommen, dass der Blick auf dem HDD verweilt, obwohl die aktuelle Situation eigentlich einen Blick aus dem Cockpitfenster verlangt.

Laut Reising [19] und Harris [15] durchliefen HDDs eine dreistufige Entwicklung: die Anzeigen der ersten Generation funktionierten dabei nach einem rein mechanischen, die der zweiten nach einem elektromechanischen und die der heutigen Generation nach einem elektrooptischen Wirkprinzip. Letztere besitzen im Gegensatz zu mechanischen und elektromechanischen Systemen keine physikalisch real existierenden Displayelemente wie Zeiger oder bewegte Skalen. Sie gehören ferner zu den emissiven Displays [20], während mechanische und elektromechanische Displays früherer Cockpitgenerationen reflektiver Natur waren.

Der Vorteil emissiver Displays gegenüber reflektiver Displays besteht vor allem in ihrer Vielseitigkeit und Flexibilität [20]. Durch sie ist es möglich verschiedene Anzeigeformate mit ein und demselben Medium sequentiell darzustellen und deren Inhalte nach Belieben zu konfigurieren. Moderne emissive Displays werden deshalb in der Fliegerei durch den Terminus Multifunktionsdisplay (MFD) beschrieben. Die Konfiguration eines MFDs kann dabei sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Vor allem der erhöhte Grad an Automatisierung, den der Einsatz von MFDs erlaubt, kann als eine Revolution in der Displayentwicklung betrachtet werden [15], die eine Vielzahl weiterer positiver Effekte nach sich zieht [5].

Ein großer Nachteil emissiver Displays besteht in der Kontrastabnahme mit zunehmendem Einfall von Umgebungslicht. Vom Display emittierte Lichtstrahlen werden von Reflexionen des Umgebungslichtes auf der Displayoberfläche überlagert. Bei reflektiven Displays steigt hingegen die Lesbarkeit mit zunehmendem externem Lichteinfall. Es sei zudem erwähnt, dass eine neuartige reflektive Displaytechnologie, die elektronische Tinte [21], [22], inzwischen eine ähnlich frei konfigurierbare Displayoberfläche bereitstellt, wie emissive MFDs, jedoch gleichzeitig eine sehr gute Lesbarkeit bei

externem Lichteinfall gewährt. Aufgrund des mangelnden Reifegrades dieser Innovation ist ein Einsatz im Cockpit bisher jedoch nicht möglich.

MFDs der ersten Generation waren zumeist Kathodenstrahlröhren (engl. Cathode Ray Tube, CRT). Sie wurden bis in die 90er Jahre in Flugzeuge integriert. Bei einem CRT wird das Bild durch Elektronenstrahlen erzeugt, die mit Hilfe von Kathoden auf die Bildschirmoberfläche gelenkt werden und dort befindliche Farbpigmente anregen, Photonen zu emittieren [20], [23].

Aufgrund der physikalisch bedingten großen Abmessungen von CRTs, kommen heute bevorzugt Flüssigkristalldisplays mit Aktivmatrix (engl. Liquid Crystal Display, LCD) [15] zum Einsatz. Bei dieser Technologie beeinflussen Flüssigkristalle je nach anliegender Spannung die Polarisationsrichtung von Lichtstrahlen, die durch eine Hintergrundbeleuchtung mit Polarisationsfilter erzeugt werden [24]. Der wesentliche Vorteil der LCD Technologie besteht in dem stark reduzierten Platzbedarf der bildzeugenden Einheit. Im Vergleich zu CRTs können bei reduzierter Bildschirmtiefe deutlich größerer Bildschirmflächen verwirklicht werden. Daher haben sie auch ein niedrigeres Gewicht. Des Weiteren erzeugen sie weniger Wärme, sind energieeffizienter [15] sowie unempfindlicher gegenüber elektromagnetischen Feldern [23]. Eine ausführliche Auflistung weiterer Vorteile der LCDs ist in Hedge [25] nachzulesen.

Eine andere Displaytechnologie, die in Cockpits bisher keine Anwendung findet, jedoch in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnte, wird durch Holografische Displays (HolDis) beschrieben. HolDis gehören zu den projizierenden Displays und funktionieren nach dem Prinzip der Rückprojektion. Das heißt, die Bildquelle, die aus leuchtstarken, farbigen LEDs besteht, befindet sich vom Betrachter aus gesehen hinter der Projektionsfläche [26], [27]. Die Projektionsfläche ist als Hologramm ausgeführt, welches Licht nur in einem schmalen Richtungsband transmittiert. Unliebsame Reflexionen von Bildschirmen im Cockpitfenster oder in der Kabinenhaube werden so vermieden. Der wesentliche Vorteil der HolDis-Technologie besteht jedoch in der freien Gestaltungsmöglichkeit der Bildschirmgeometrie. Folglich kann die zur Verfügung stehende Cockpitfläche optimal ausgenutzt werden.

2.2.2. Großflächendisplays

Ein limitierender Faktor bei der visuellen Informationsaufnahme ist durch das physiologische Auflösungsvermögen des Auges gegeben (Kap. 2.4.2). Um die reine Lesbarkeit von Informationen zu gewährleisten, müssen die auf eine gesunde Netzhaut projizierten Abbilder von Buchstaben eine Mindestgröße von ca. fünf Bogenminuten besitzen [28]. Das Auge erkennt dabei Details mit einer Auflösung von einer Bogenminute (ca. $0,017^\circ$). In Bezug auf das Displaydesign bedeutet dies, dass eine Steigerung der Displayauflösung nur in gewissen Grenzen zu einer Erhöhung der vermittelbaren Informationsmenge führt. Ist die Sättigung erreicht, muss die Darstellungsfläche vergrößert oder der Abstand zu dieser verringert werden.

Aufgrund des erhöhten Aufwandes zur Akkommodation sehr naher Objekte sowie ergonomischer Restriktionen, die sich bei der Interaktion mit dem Display ergeben, kann der Abstand zur Displayfläche nicht beliebig klein gewählt werden. Möchte man die zu vermittelnde Informationsmenge erhöhen, ist daher die Displayfläche zu vergrößern.

Eine Möglichkeit die Displayfläche zu vergrößern besteht darin, mehrere Displayeinheiten zu verwenden. Da die einzelnen Displayeinheiten physikalisch und somit räumlich getrennt sind, eignet sich diese Konfiguration jedoch nur bedingt zur displayübergreifenden Darstellung von Informationen gleichen semantischen Hintergrundes. Der im Cockpit zur Verfügung stehende Platz wird aufgrund der Freiräume zwischen den einzelnen Displayeinheiten zudem nicht effektiv ausgenutzt (Abb. 2-1).



Abb. 2-1: Freiräume (violett) zwischen einzelnen Displayeinheiten im A400M Cockpit [29]

Die Verwendung eines einzigen großflächigen Displays schafft hierbei Abhilfe. Die sogenannten **Großflächendisplays** (engl. Large Area Display, LAD) sind als eine spezielle Untergruppierung der Head Down Displays zu verstehen. Während mit CRTs und LCDs früherer Generationen mehrere Displayeinheiten im Cockpit integriert werden mussten, erlaubt der technologische Fortschritt der vergangenen Jahre, insbesondere die Entwicklung der LCDs und HolDis, heute die Verwendung eines einzigen, großflächigen Displays.

Der Vorteil dieser Technologie besteht nicht nur in der Erhöhung der darstellbaren Informationsmenge. Durch die gewonnene Displayfläche ergeben sich auch mehr gestalterische Freiräume beim Displaydesign. Somit sind verständlichere und übersichtlichere Darstellungen realisierbar [30], [31]. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Anordnung und die Größe von Displayelementen zu nennen. So können Informationsgruppen entsprechend ihrer Wichtigkeit in verschiedenen Größen und in verschiedenen Displaybereichen dargestellt werden.

2.2.3. Synthetische Sichtsysteme

Unter dem Begriff Synthetische Sichtsysteme (engl. **Synthetic Visions Systems, SVS**) werden Avioniksysteme zusammengefasst, die ein synthetisches Bild der Flugzeugumgebung generieren [32]. Strenggenommen handelt es sich bei SVS daher nicht um eine reine Displaytechnologie, sondern vielmehr um eine komplexe Systemeinheit, bestehend aus den drei Hauptkomponenten: Sensorik/Datenbank, Computer und Anzeigemedium [33]. Die Komponenten der Sensorik und Datenbank können laut Foyle [33] verschiedene Infrarot- und Radarsysteme, Navigationsdatenbanken, Flugzustands- und Gefährdungsinformationssysteme umfassen. Die Computerkomponente besteht zumeist aus jeweils einer Einheit zur Durchführung der perspektivischen Transformation, der Datenfusion, der Bildobjekterkennung, der Bildgenerierung, der Integritätsüberwachung und der Schnittstellenkommunikation. Komponenten der Anzeige können das Primary Flight Display, das Navigationsdisplay, das Vertical Situation Display (VSD), das HUD, die Moving Map sowie das HMD sein.

Im Unterschied zu **Enhanced Vision Systems (EVS)**, bei denen ein Bild der realen Umgebung allein durch Sensoren abgeleitet und angereichert wird [32], erfolgt die Bildgenerierung bei SVS zusätzlich durch Datenbankinformationen [33]. Ein daraus resultierender Vorteil des SVS gegenüber EVS besteht in der Unabhängigkeit gegenüber atmosphärischen Bedingungen, welche die Sensorsignalkualität beeinflussen [34]. Die Güte des dargebotenen Bildes wird also allein durch die Genauigkeit der bordeigenen Datenbank, der Qualität der GPS-Messung und der Kapazität der Recheneinheiten beschränkt [34].

In Bezug auf die Flugsicherheit können SVS laut Prinzell [35] einen elementaren Beitrag leisten, indem sie das Pilotenbewusstsein über laterale und vertikale Ablagen von einer Trajektorie sowie das Bewusstsein über den Verlauf des Geländes stärken. Großes Potenzial sehen Prinzell [35] und Schnell [36] dabei vor allem in der Unterstützung zur Vermeidung eines kontrollierten Fluges in das Terrain

(CFIT¹). Begründet wird dies mit einer reduzierten Arbeitsbelastung, kürzeren Blickpfaden beim Ablesen der Displays [36] und einer Steigerung des Situationsbewusstseins [35]. Ein prominentes Beispiel einer SVS-Darstellung sind Pathway in the Sky (Tunnel, Highway in the Sky) Anzeigen. Sie unterstützen den Piloten bei der primären Flugführungsaufgabe vor allem während des Landeanfluges, indem sie in Echtzeit Ist- und Nominaltrajektorie sowie den prädizierten Flugpfad visualisieren [37]. Des Weiteren können zusätzliche Informationen über Flugzeugs subsysteme, den Flugverkehr [38] oder andere Gefahrenquellen in derselben Darstellung überlagert eingeblendet werden. Ein großer Vorteil kommt vor allem dann zum Tragen, wenn für das menschliche Auge nicht sichtbare Informationen mit Raumbezug, beispielsweise aufgrund großer Entfernung oder Verdeckung, durch SVS dem Piloten visualisiert werden.

Bei der Integration zu vieler Informationen in die synthetische Sicht besteht laut Wickens [38] jedoch die Gefahr der visuellen Überfrachtung (engl. Display Clutter). In einem solchen Fall wird die Kompaktheit der Darstellung zu Lasten der Lesbarkeit erkauft. Es ist daher genau abzuwägen, welche Informationen mit einem SVS darzustellen sind.

2.3. Mathematische und Physikalische Grundlagen

Durch technische Errungenschaften wie MFDs und SVSs genießen Entwickler heute eine Vielzahl von Freiheiten bei der Gestaltung von Cockpitdisplays. Die Grenzen werden dabei weniger durch technische Gegebenheiten, sondern meist durch ergonomische und psychologische Anforderungen gesetzt. Bei der Suche nach einer aufgabenspezifischen optimalen Darstellung sind somit vor allem Aspekte des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Kap. 2.4.1) zu berücksichtigen.

Zur Darstellung quantitativer analoger Daten, in deren Kategorie auch Raumzustandsinformationen einzuordnen sind, betrachten Wickens et al. [7] Graphen beziehungsweise Diagramme als ein geeignetes Mittel. Der Vorteil von Graphen gegenüber digitalen Darstellungen besteht darin, dass die Erfassung von groben Werten, von Differenzen und Abweichungen sowie von Trends und zeitlichen Änderungen unterstützt wird [15]. Die Visualisierung auf elektrooptischen Displays ermöglicht zudem die Integration und Kombination verschiedener Graphen in einer Anzeige. Vor- und Nachteile solcher integrativer Darstellungen erläutert Wickens [39] im Rahmen des sogenannten proximity compatibility principles. Die Grundidee dieses Darstellungsprinzips besteht darin, die kognitive Beanspruchung des Operators durch die Minimierung mentaler Integrationsprozesse zu reduzieren. Dazu müssen die zu integrierenden Informationen in unmittelbarer räumlicher Nähe dargestellt werden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Aufgabe auch die Integration verschiedener Informationsquellen verlangt.

Das Fliegen eines Flugzeuges erfordert ein ganzheitliches Verständnis verschiedenster Raumzustandsgrößen. Es wird daher, in Bezug auf die Raumdimensionen, eine möglichst integrierte Darstellung angestrebt. Als problematisch erweist sich dabei die Verschiedenheit der Dimensionen des abzubildenden Raumes und denen des Visualisierungsmediums. Wir leben in einer dreidimensionalen Welt. MFDs können Informationen aber nur auf zwei Displaydimensionen visualisieren. Dieser Diskrepanz kann durch eine besondere geometrische Transformation begegnet werden: der Projektion. Je nach Wahl des Algorithmus kann mit ihr ein zwei- oder eindimensionales Abbild der dreidimensionalen Welt erzeugt werden. Sie beschreibt daher eine nicht bijektive, also nicht-umkehrbare, Transformation. Als wichtige Projektionsparameter sind die Entfernung des Projektionszentrums von der Projektionsfläche, die Ausrichtung und Krümmung der Projektionsfläche und die geometrischen Eigenschaften der Projektionsstrahlen zu erwähnen.

Basierend auf den genannten Parametern unterscheidet Salomon [40] lineare, perspektivische und nichtlineare Projektionen. Bei linearen und perspektivischen Projektionen ist die Projektionsfläche planar und die Projektionsstrahlen verlaufen geradlinig. Während bei einer linearen Projektion eine Abbildungsmatrix basierend auf kartesischen Koordinaten gebildet werden kann, erfordert dies bei der

¹ CFIT: Controlled Flight Into Terrain

perspektivischen Projektion die Verwendung homogener Koordinaten². Da somit beide Projektionsarten die Linearitätsbedingung erfüllen, lassen sie sich jeweils durch eine einzige Abbildungsmatrix innerhalb eines homogenen Gleichungssystems beschreiben. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn neben der Projektion weitere mathematische Transformationen wie Rotation, Translation, Streckung oder Spiegelungen angewandt werden, da alle Transformationsmatrizen zu einer einzigen Matrix multipliziert werden können. Nichtlineare Projektionen erfordern hingegen die Anwendung komplexerer mathematischer Operationen und lassen sich nicht mit einer Abbildungsmatrix beschreiben.

2.3.1. Lineare und perspektivische Projektionen

Mit der Klasse der linearen und perspektivischen Projektionen werden Projektionsarten zusammengefasst, die sich durch vergleichsweise einfache Abbildungsvorschriften auszeichnen. Sie besitzen eine planare Projektionsfläche und haben die Eigenschaft, gerade Linien des euklidischen Raums in der Abbildung stets auch als solche darzustellen.

Lineare und perspektivische Projektionen können wiederum in weitere Subklassen unterteilt werden [41]. Eine übersichtliche Darstellung dieser Subklassen ist in Abb. 2-2 visualisiert. In einer ersten Instanz klassifiziert Carlbom [41] dabei lineare Projektionen in Parallelprojektionen, sofern sich das Projektionszentrum im Unendlichen befindet, und in Zentralprojektionen beziehungsweise perspektivische Projektionen, wenn der Abstand des Projektionszentrums von der Projektionsfläche durch eine reelle Zahl beschrieben wird.

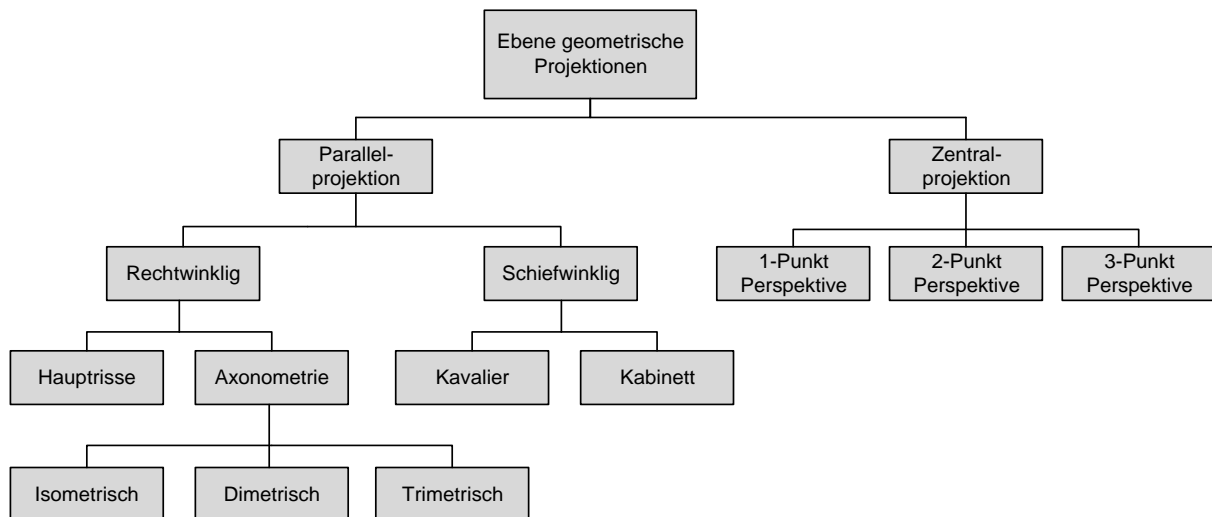


Abb. 2-2: Ebene geometrische Projektionen nach Carlbom [41]

² Homogene Koordinaten (projektive Koordinaten): im dreidimensionalen Raum werden Punkte mit Hilfe von Geraden beschrieben, die durch den Koordinatenursprung verlaufen. Die Dimension der Punktkoordinaten wird dafür um eins auf vier erweitert. Dadurch ist es möglich auch einfache nicht-lineare Abbildungen, wie Translationen und Zentralprojektionen, durch Multiplikation der homogenen Koordinaten mit Matrizen zu beschreiben.

2.3.1.1. Parallelprojektionen

Wie sich aus dem Namen bereits schließen lässt, verlaufen bei der Parallelprojektion sämtliche Projektionsstrahlen parallel zueinander. Parallele Linien der realen Welt werden daher stets auch als parallele Linien abgebildet. Treffen sie rechtwinklig auf eine planare Projektionsfläche, spricht man von einer orthografischen oder rechtwinkligen Projektion [41]. Die bekannteste orthografische Projektionsart bilden die Hauptrisse. Bei ihnen erfolgt die Ausrichtung der Projektionsstrahlen entlang einer Raumhauptachse³.

Unter Vernachlässigung der Erdkrümmung für kleine Abschnitte der Erdoberfläche, findet die Hauptrissprojektion in der Fliegerei als Navigationsdisplays (Map, PPI) Anwendung. Rauminformationen werden dabei für die Horizontalebene (Draufsicht) visualisiert.

Als besonders nützliche Eigenschaft der Hauptrissprojektion sind deren lineare und längenskalierten Bildachsen des Abbildes zu nennen. Vor allem wenn beide Bildachsen in Richtung der Raumhauptachsen des abzubildenden Raumes ausgerichtet sind, ermöglichen sie eine hohe Präzision bei der Erfassung von Längenmaßen. Gleichwohl besitzen Hauptrissprojektionen den Nachteil der Beschränkung der Darstellung auf eben diese zwei Raumdimensionen des Abbildungsraumes.

Verhalten sich die Projektionsstrahlen parallel zueinander, aber nicht parallel zu einer Raumhauptachse, werden alle drei Raumdimensionen des Abbildungsraumes in einem sogenannten axonometrischen Abbild visualisiert [40]. Im Kontext der Fliegerei eignet sich diese Projektionsart für dreidimensionale Übersichtsdarstellungen.

Ein Beispiel zur mathematischen Beschreibung einer Hauptrissprojektion in z-Richtung ist im Folgenden in homogenen Koordinaten sowie in zweidimensionalen Koordinaten des Abbildes gegeben:

$$P_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_H = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_H \quad P = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

2.3.1.2. Zentralprojektionen

Im Unterschied zur Parallelprojektion konvergieren die Projektionsstrahlen einer Zentralprojektion und treffen sich in einem gemeinsamen Projektionszentrum. Durch diese Eigenschaft werden identische Objekte, die sich in verschiedenen Entfernungen befinden, in unterschiedlichen Größen abgebildet. Es entsteht ein natürlicher Eindruck von Tiefe. In diesem Zusammenhang spricht man auch von perspektivischen Abbildungen⁴, bzw. Linearperspektiven. Parallele Linien, die nicht parallel zur Projektionsfläche verlaufen, konvergieren in der Abbildung und schneiden sich in einem gemeinsamen Fluchtpunkt. Dieser ist ein gedachter Punkt, der im Unendlichen liegt. Fluchtpunkte, die sich auf den Raumhauptachsen befinden, werden in diesem Zusammenhang als Hauptfluchtpunkte bezeichnet. Eine perspektivische Abbildung kann theoretisch beliebig viele Fluchtpunkte aufweisen, die Anzahl ihrer Hauptfluchtpunkte ist jedoch beschränkt. Demnach lassen sie sich in 1-Punkt, 2-Punkt und 3-Punkt Perspektiven [41] klassifizieren. Die 1-Punkt Perspektive wird auch Zentralperspektive genannt, da der Fluchtpunkt bei einem zur Projektionsachse symmetrischen Blickfeld stets in der Bildmitte erscheint.

Die Bildachsen einer solchen zentralprojizierten Abbildung beschreiben nichtlineare Winkelskalen, deren Auflösungen mit steigender Entfernung vom Bildzentrum zunehmen. Entfernungsskalen können durch zusätzliche Gitternetz- und Lotlinien in die Abbildung integriert werden (siehe Kap. 2.5.5). Die bilderzeugende Einheit wird bei Zentralprojektionen auch virtuelle Kamera genannt.

³ Raumhauptachse: Achse des den Raum beschreibenden kartesischen Koordinatenreferenzsystems

⁴ Perspektivische Abbildung: Beschreibt die Technik der Darstellung dreidimensionaler Objekte und ihrer räumlichen Tiefe auf einer zweidimensionalen Oberfläche [169]. Die Umsetzung erfolgt durch die Anwendung einer Zentralprojektion. Der dreidimensionale Eindruck wird oftmals durch die Integration von grafischen Tiefenschlüsseln (Kap. 2.4.3) verstärkt.

Anwendung finden diese perspektivischen Abbildungen in der Fliegerei häufig als 3D-Flugführungsanzeigen (Tunnel, Highway in the Sky) [42]. Sie erleichtern die primäre Flugführungsaufgabe durch die Darstellung von Fluglagewinkeln sowie vertikalen und lateralen Ablagen. Des Weiteren finden sie, ähnlich der in Kap 2.3.1.1 beschriebenen Parallelprojektion, Anwendung in Form von dreidimensionalen Übersichtsdarstellungen.

Die mathematische Beschreibung einer planaren Zentralprojektion in z-Richtung ist in Formel (2-2) für homogene Koordinaten und für zweidimensionale Abbildkoordinaten gegeben. Der Parameter d repräsentiert den Abstand zwischen Projektionszentrum und Projektionsfläche.

$$P_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_H = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ z/d + 1 \end{pmatrix}_H \equiv \begin{pmatrix} d \cdot x/z \\ d \cdot y/z \\ 0 \\ 1 + d/z \end{pmatrix}_H \quad P = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \cdot x/z \\ d \cdot y/z \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

2.3.2. Nichtlineare Projektionen

Im Gegensatz zu den linearen und perspektivischen Projektionen lassen sich nichtlineare Projektionen nicht durch eine einzige Abbildungsmatrix beschreiben, da sie die erforderliche Linearitätsbedingung nicht erfüllen. Die Ursache von Nichtlinearität können ein unstetiger Projektionsalgorithmus, eine gekrümmte Projektionsfläche oder nicht geradlinig verlaufende Projektionsstrahlen sein. Daraus ergibt sich eine unendlich große Vielfalt an möglichen nichtlinearen Projektionen.

Von einem unstetigen Projektionsalgorithmus ist immer dann die Rede, wenn Abbildungsvorschriften für verschiedene Bildbereiche variieren. Dies ist zum Beispiel bei der kubischen Projektion der Fall, bei der unterschiedlich orientierte Projektionsflächen zum Einsatz kommen.

Bei Darstellungen mit einer einzigen Projektionsfläche, die jedoch gekrümmt ist, spricht man auch von nicht-planaren Projektionen. Typische Beispiele dafür sind bestimmte Kartenprojektionen oder Panoramen⁵.

Verlaufen bei einer Projektion die Projektionsstrahlen gekrümmt oder geknickt, handelt es sich um eine nichtgeradlinige Projektion. Als Beispiele optischer Anwendungen sind die teleskopische, mikroskopische und die Fischaugenprojektion zu nennen. Eine Krümmung oder Knickung der Projektionsstrahlen erreicht man dabei durch die Verwendung von Linsen oder Spiegeln.

Die Generierung des Bildes innerhalb des menschlichen Auges ist ein Beispiel einer sowohl nicht-planaren als auch nicht geradlinigen Projektion. Der Glaskörper des Auges beschreibt annähernd eine Kugelform. Die Projektion erfolgt auf dessen konkav gekrümmte Innenfläche, der Netzhaut. Zuvor wird der Strahlengang des einfallenden Lichtes durch die Kristalllinse fokussiert [43].

Beispiele nicht linearer Abbildungen, die bereits heute im operativen Flugbetrieb Anwendung finden, sind unter anderem das sogenannte Vertical Situation Display (VSD) [37], das DASS, das B-Scope und E-Scope Format [44].

Das Vertical Situation Display stellt den vertikalen Tarjektorienverlauf in Abhängigkeit der horizontalen Entfernung dar. Die horizontale Entfernung entspricht dabei der auf der Trajektorie zurückgelegten oder zurückzulegenden horizontalen Wegstrecke. Die Projektionsfläche folgt dabei dem horizontalen Verlauf der Trajektorie.

Im DASS Format erfolgt die Darstellung relativer, horizontaler Objektpositionen ähnlich einer zweidimensionalen Karte. Zur besseren Lesbarkeit im Zentrumsbereich wird der Nullpunkt des zu Grunde liegenden polaren Koordinatensystems jedoch auf einen Kreis platziert, der sich konzentrisch zum Koordinatenursprung verhält. Horizontale Entfernungen werden auf diesen Kreis referenziert.

⁵ Panorama: Eine lückenlose Ansicht des gesamten umgebenden Raums [171]. Der Begriff Panorama leitet sich aus dem griechischen Wörtern „pan“ für alles und „horama“ für sehen ab.

Beim B-Scope Format werden relative, horizontale Objektentfernungen über den relativen Objektazimutwinkeln aufgetragen. Dies erfolgt jedoch nicht in einem polaren, sondern in einem kartesischen Koordinatensystem. Dies hat den Vorteil, dass Azimutwinkel nahegelegener Objekte in der Abbildung eine höhere Auflösung besitzen. Das E-Scope Format stellt hingegen absolute Objekthöhen über horizontalen Objektentfernungen für die vordere, das eigene Flugzeug umgebende Hemisphäre dar.

Analog zu den linearisierbaren, perspektivischen Projektionen können auch nicht lineare Projektionen perspektivische Eigenschaften besitzen, sofern sie auf einer Zentralprojektion mit geradlinigen Projektionsstrahlen basieren. Zur Projektion eines möglichst großen Raumbereichs kann das Projektionszentrum dabei mittig in einem Volumenkörper, dessen Oberfläche als Projektionsfläche dient, platziert werden. Als Projektionskörper ist dabei prinzipiell jeder Volumenkörper denkbar.

Da mit einer Zunahme der Komplexität des Projektionskörpers in der Abbildung zunehmend Verzerrungen auftreten, werden in den beiden folgenden Kapiteln nur die zylindrische- und die sphärische Zentralprojektion genauer betrachtet.

2.3.2.1. Zylindrische Zentralprojektionen

Bei der zylindrischen Zentralprojektion erfolgt die Abbildung der Umwelt auf die Mantelfläche eines Zylinders, dessen Grundriss konzentrisch zum Projektionszentrum angeordnet ist. Die Abbildungsvorschriften für die horizontale und die vertikale Displaydimension sind dabei verschieden. Während für die vertikale Displaydimension die lineare Abbildungsvorschrift der planaren Zentralprojektion Gültigkeit besitzt, folgt die horizontale Abbildungsvorschrift einem nichtlinearen, trigonometrischen Zusammenhang, siehe Formel (2-3). In Abhängigkeit der Ausrichtung des Zylinders gegenüber den Raumhauptachsen sind perspektivische Darstellungen mit bis zu sechs Hauptfluchtpunkten realisierbar. Hauptfluchtlinien der Horizontalebene verlaufen im Gegensatz zur planaren Zentralprojektion (Kap. 2.3.1.2) jedoch nicht geradlinig. Die Zylindermantelfläche beschreibt eine euklidische Ebene⁶, sie kann daher auf eine planare Ebene abgewickelt werden. Die Bildachsen des zweidimensionalen Abbildes beschreiben für die Horizontaldimension eine lineare und für die Vertikaldimension eine nichtlineare Winkelskala.

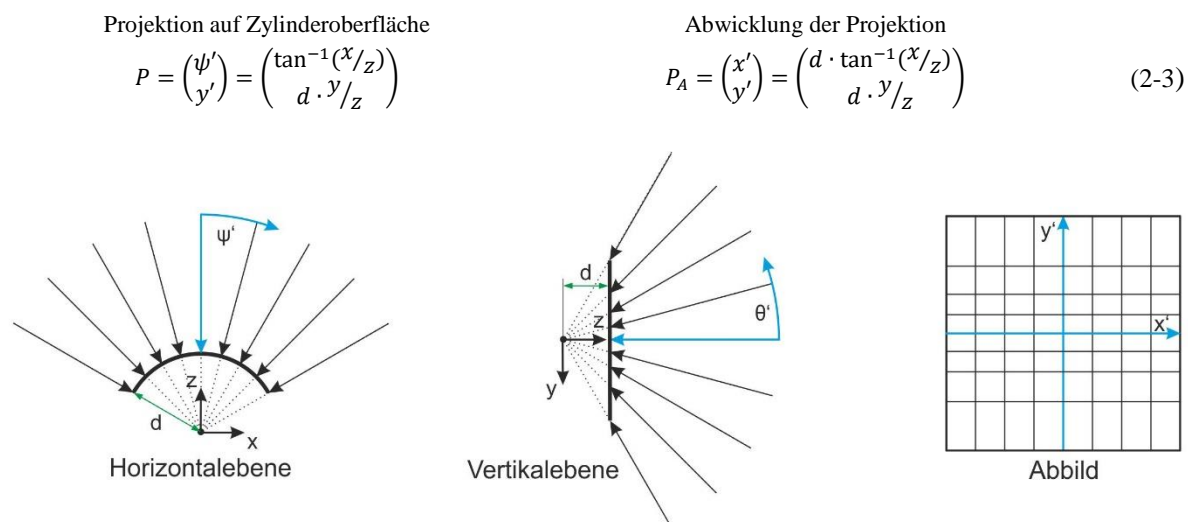


Abb. 2-3: Prinzip der Zylinderprojektion

⁶ Euklidische Ebene: Ebene des euklidischen Raumes \mathbb{R}^3 , für die das Parallelenaxiom Bestand hat [167], [168]

2.3.2.2. Sphärische Zentralprojektion

Aufgrund der richtungsunabhängigen, gleichmäßigen Krümmung von Kugeloberflächen sind die Abbildungsvorschriften bei der Verwendung einer sphärischen Zentralprojektion für die horizontale und die vertikale Displaydimension gleich, sofern sich das Projektionszentrum in der Kugelmittle befindet. Sie verhalten sich beide nichtlinear und folgen dem in Formel (2-4) beschriebenen trigonometrischen Zusammenhang. Genau wie bei der zylindrischen Zentralprojektion sind perspektivische Darstellungen mit bis zu sechs Hauptfluchtpunkten möglich. Hauptfluchtlinien der Horizontalebene verlaufen ebenfalls nicht geradlinig. Da die Kugeloberfläche keine euklidische Ebene beschreibt, ist es nicht möglich Abschnitte dieser verzerrungsfrei auf einer planaren Ebene abzuwickeln. Das Abbild muss daher angepasst werden. Eine Möglichkeit einer solchen Anpassung beschreibt die in der Kartografie verwendete Rektangularprojektion (Plate Carree). Sie zeichnet sich dadurch aus, dass alle Rechtecke des aufgespannten Winkelgitternetzes gleich groß sind. Die Abbildung der Kugeloberfläche kann so auf eine rechteckige und planare Bildfläche erfolgen.

Das Projektionsprinzip der Kugelprojektion findet im Cockpit heute bereits im sogenannten C-Scope Format Anwendung. Das C-Scope Format visualisiert relative Objektazimut- und relative Objektelevisionswinkel für einen begrenzten Bereich der vorderen umgebenden Hemisphäre. Da es ausschließlich zur Vermittlung zweidimensionaler Informationen dient und die Raumtiefe nicht berücksichtigt, beschreibt es keine perspektivische Darstellung im klassischen Sinn.

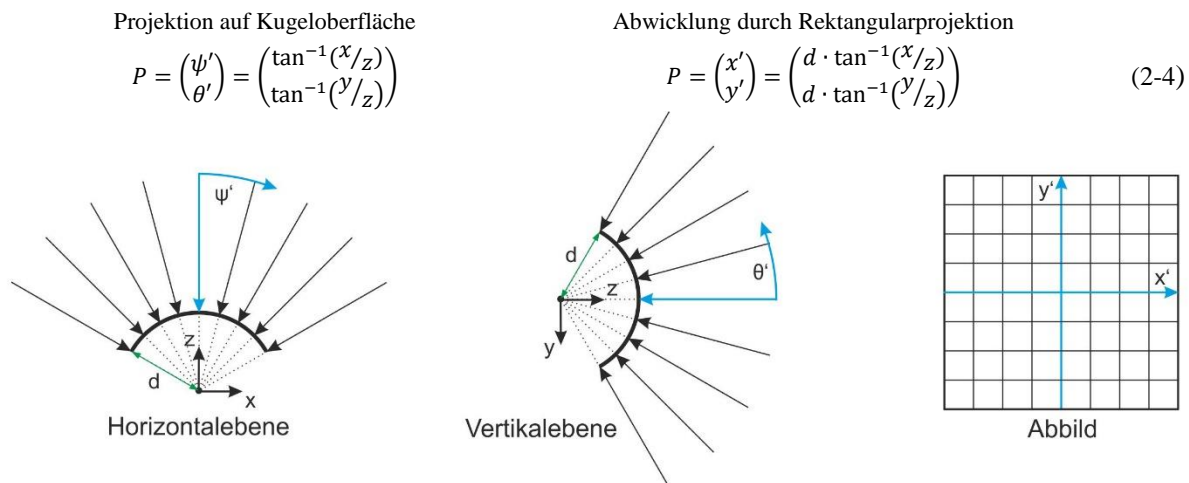


Abb. 2-4: Prinzip der Kugelprojektion

2.3.3. Darstellungsparameter

Durch die Wahl des Projektionstyps wird festgelegt, auf welche Art der umgebende Raum auf einem zweidimensionalen Display dargestellt werden soll. Für jede Projektion existieren jedoch zwei weitere wesentliche Parameter, die Einfluss auf die Abbildung haben: das Bezugssystem und der Abbildungsausschnitt.

2.3.3.1. Bezugssysteme räumlicher Darstellungen

In Kapitel 2.1.2.2 wird der Unterschied zwischen globalen und lokalen Bezugssystemen erläutert. Im Kontext der Visualisierung von Rauminformationen für Cockpitanwendungen sind ausschließlich lokale Bezugssysteme von Interesse. Schließlich macht es keinen Sinn lokale Rauminformationen auf den Erdmittelpunkt zu beziehen.

Wickens [45] definiert sechs lokale Bezugssysteme, von denen das weltreferenzierte und das egozentrische hervorzuheben sind. Als weltreferenziert betrachtet er ein Bezugssystem dann, wenn es auf die Geoidoberfläche des Erdkörpers referenziert ist, wie zum Beispiel das erdfeste NED-System.

Dreidimensionale oder perspektivische Abbildungen, denen ein weltreferenziertes Bezugssystem zu Grunde liegt, werden in der Fachwelt auch exozentrisch oder allozentrisch bezeichnet [46].

Als egozentrisch beschreibt Wickens solche Systeme, deren Positionierung und Ausrichtung an die des Beobachters gebunden sind. Im Fall von Cockpitdarstellung ist unter einem egozentrischen Bezugssystem stets das flugzeugfeste System zu verstehen (Abb. 2-5).

Eine Mischform aus egozentrischen und exozentrischen Systemen stellen die sogenannten heterozentrischen Bezugssysteme dar [46]. Heterozentrische Projektionen umfassen somit alle Darstellungen, die sowohl egozentrische als auch exozentrische Eigenschaften aufweisen [47]. Variiert werden können dabei die Position, die Ausrichtung und die Bewegung der virtuellen Kamera [48]. Als Beispiel eines Bezugssystems mit einem hohen Grad an Egozentrität ist hierbei das flugzeugfeste HD-System (Kapitel 2.1.2.3) zu nennen, das einerseits die Position, die Geschwindigkeit und den Kurswinkel des Flugzeugs annimmt und andererseits stets parallel zur Geoidoberfläche des Erdkörpers ausgerichtet ist. Ein Beispiel mit einem hohen Grad an Exozentrität bilden die sogenannten gebundenen Bezugssysteme (tethered). Bei dieser Abbildungsart entspricht die Position der virtuellen Kamera zwar nicht der Flugzeugposition. Sie wird im Unterschied zu den rein exozentrischen Darstellungen jedoch mit der Flugzeugbewegung mitgeführt.

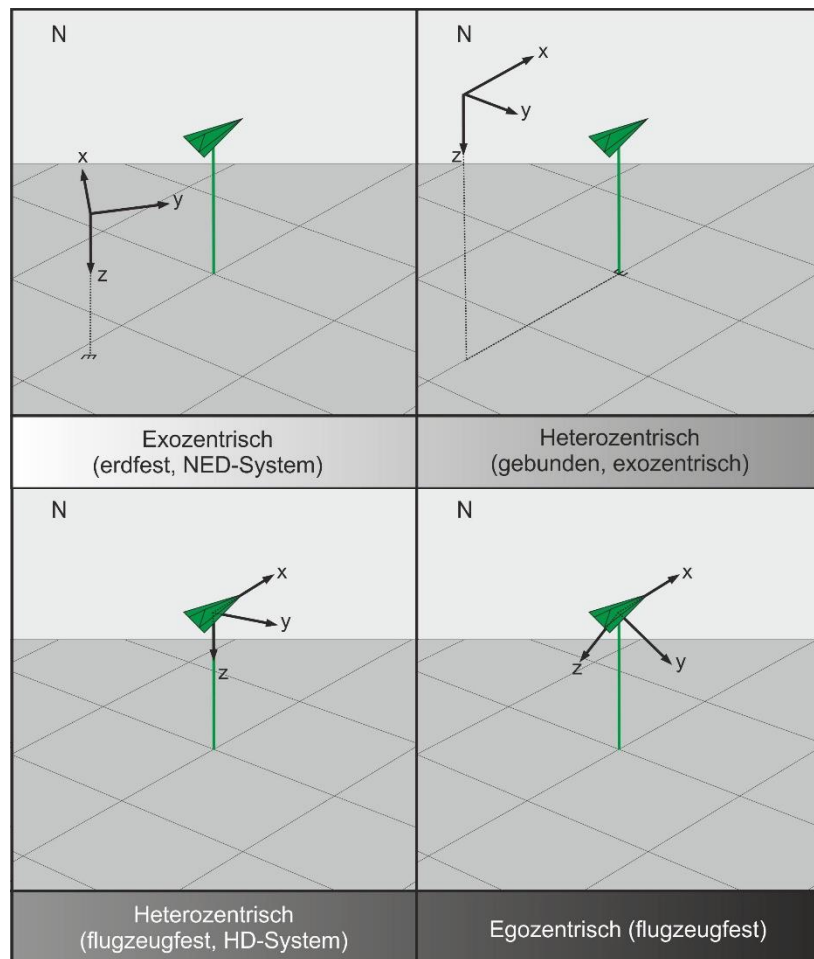


Abb. 2-5: Visualisierung verschiedener Bezugssysteme

2.3.3.2. Abbildungsausschnitt

Den zweiten wichtigen Projektionsparameter beschreibt der Abbildungsausschnitt. Durch ihn wird die Größe des abzubildenden, räumlichen Segmentes definiert. Die Darstellung eines vergleichsweise großen räumlichen Segmentes resultiert bei konstanter Auflösung in einem niedrigen Detaillierungsgrad. Der Abbildungsausschnitt beschreibt somit den Kompromiss zwischen der Bereitstellung eines Überblickes und der Vermittlung von Detailinformationen.

Bei parallel projizierten Darstellungen wird der Abbildungsausschnitt durch die Skalierung von Längenmaßen definiert (Abb. 2-6). Die Bildachsen beschreiben dabei lineare Längenskalen. Auf zweidimensionalen Karten wird durch den Abbildungsmaßstab das Verhältnis von Längeneinheiten auf dem Display zu Längeneinheiten der realen Welt beschrieben.

Bei zentral projizierten bzw. perspektivischen Darstellungen wird der Abbildungsausschnitt hingegen durch die Skalierung von Winkelmaßen definiert. Die Bildachsen beschreiben dabei lineare oder nichtlineare Winkelskalen. Der Winkelmaßstab umfasst das Verhältnis des geometrischen Blickfeldes (GFOV) zu dem realen Blickfeld. Das geometrische Blickfeld beschreibt die Größe des räumlichen Segmentes, das die virtuelle Kamera abbildet. Das reale Blickfeld repräsentiert den Winkelbereich, der von den Augen des Betrachters ausgehend durch den Displayrand aufgespannt wird. Entsprechend der Größe des Winkelmaßstabes werden wahrheitsgetreue, teleskopische und weitwinklige Darstellungen unterschieden [49].

Eine weitere Möglichkeit perspektivische Abbildungen anzupassen besteht in der Skalierung der dritten Dimension, der Raumentiefe. Die Manipulation dieses Parameters führt dazu, dass Objekte weiter weg oder näher erscheinen, als es in Realität der Fall ist. Dies kann durch Anpassung der vertikalen Abbildungsvorschrift erfolgen.

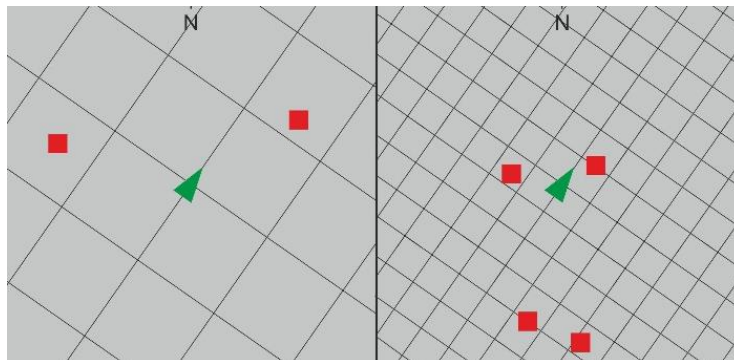


Abb. 2-6: Visualisierung eines kleinen (links) und eines großen (rechts) Abbildungsausschnittes einer orthografischen Parallelprojektion

2.3.4. Transformation der gekrümmten Erdoberfläche zu einer planaren Ebene

Höheninformationen kommen in der Fliegerei einer besonderen Bedeutung zu. Zum einen ist die Kenntnis der eigenen Flughöhe und der Höhe des umgebenden Geländes essentiell, um das Fluggerät sicher zu fliegen. Zum anderen sind Flughöhen anderer Objekte aus verkehrstechnischen und taktischen Gründen von großem Interesse. Die mentale Prädiktion zukünftiger Objektzustände erfordert auch die Betrachtung von Energiebilanzen. Eine wichtige Komponente ist dabei das potenzielle Energieniveau, auf welches direkt aus dem Abstand zwischen Objekthöhe und Erdoberfläche geschlossen werden kann.

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, können SVS die Raumentiefe theoretisch unendlich weit abbilden. Diese eigentlich positive Eigenschaft führt bei der Verwendung einer Zentralprojektion auf der gekrümmten Erdoberfläche jedoch dazu, dass Objekte großer Entfernung in geringerer Höhe erscheinen, als dies real der Fall ist. Während dieser Effekt für geringe Entfernungen nur marginal ist, kann er bei großen Entfernungen nicht vernachlässigt werden, siehe Abb. 2-7.

Um dieser Problematik zu begegnen, kann die gekrümmte Erdoberfläche in eine planare Ebene transformiert und die umgebende Atmosphäre in vertikaler Richtung derart verschoben werden, dass Äquipotentialflächen⁷ planar verlaufen. Die Position von Objekten wird dabei so angepasst, dass diese der realen Absolutentfernung bei einer gekrümmten Erdoberfläche entspricht. Relative Objektwinkel in der Vertikaldimension, auch Elevationswinkel genannt, werden bei dieser Transformation allerdings verfälscht dargestellt. Bei einer Objektentfernung von 100 NM beträgt der Fehler des Elevationswinkels ca. $0,8^\circ$. Diese Transformation ist vor allem hilfreich, um Objekte in der Nähe der Erdoberfläche in der Abbildung nicht unterhalb dieser erscheinen zu lassen.

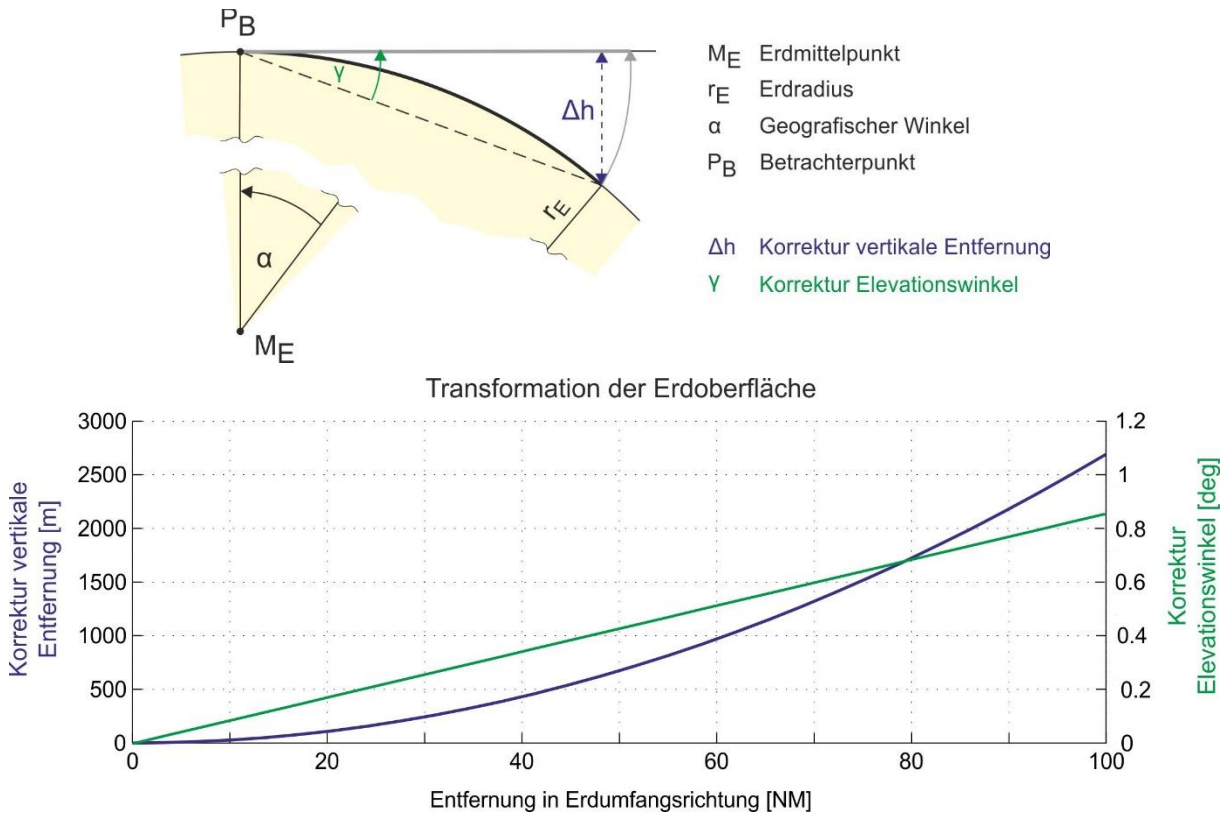


Abb. 2-7: Korrektur der vertikalen Entfernung und des Elevationswinkels

⁷ Äquipotentialebenen: Flächen gleicher Höhe bzw. gleichen potentiellen Energieniveaus [170]

2.4. Psychologische und physiologische Aspekte

In diesem Kapitel werden psychologische und physiologische Grundlagen erläutert, deren Kenntnis Voraussetzung für die Entwicklung von Cockpitanzeigen ist. Neben der Konzeption der Panoramaansicht sind diese Kenntnisse auch bei der Auswahl der Versuchsmethodik und der Ergebnisinterpretation hilfreich. Dazu wird der menschliche Informationsverarbeitungsprozess nach einem Modell von Wickens erklärt. Des Weiteren werden der Prozess der visuellen Informationsaufnahme sowie Aspekte der Wahrnehmung räumlicher Tiefe beschrieben. Abschließend wird der abstrakte Begriff des Situationsbewusstseins genauer erläutert.

2.4.1. Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess

Das menschliche Wesen zeichnet sich durch seine besonders ausgeprägte Fähigkeit zum Denken und überlegten Handeln aus. Um diese Fähigkeit bei der Gestaltung von Mensch-Maschinen Schnittstellen zu unterstützen, ist ein grundlegendes Verständnis über die bei der menschlichen Informationsverarbeitung involvierten Prozesse nötig. Wickens [7] beschreibt den Informationsverarbeitungsprozess als eine Serie von Modulen, deren Funktion die Transformation oder Bearbeitung von Informationen ist. Die einzelnen Komponenten des Modells können dabei in drei verschiedenen Ebenen dargestellt werden: die Wahrnehmungs-, die Kognitions- und die Aktionsebene (Abb. 2-8).

Um dem menschlichen Gehirn Zugang zu Informationen der Umgebung zu ermöglichen, müssen diese in einem ersten Schritt durch Sinneszellen aufgenommen werden. Die erfassten "Rohdaten" werden für kurze Zeit im sensorischen Speicher hinterlegt. In Abhängigkeit der subjektiv empfundenen Wichtigkeit werden die Rohdaten im Wahrnehmungsprozess gefiltert und interpretiert. Der Mensch nimmt daher nur einen bestimmten Teil der in der Umgebung potentiell verfügbaren Informationen wahr [50, S.9]. Die weitergeleiteten Informationen werden anschließend im Arbeitsgedächtnis in Form von Denkvorgängen integriert und verarbeitet. Die kognitiven Prozesse des Arbeitsgedächtnisses beanspruchen dabei im Vergleich zu Prozessen der Wahrnehmung deutlich mehr Zeit und erfordern mentale Anstrengungen. Ferner stellt das Arbeitsgedächtnis nur einen temporären Speicher zur Verfügung. Gelerntes muss daher durch eine andere Komponente der Kognitionsebene, das Langzeitgedächtnis, gespeichert werden. Im Gegensatz zum Arbeitsgedächtnis hinterlegt das Langzeitgedächtnis Informationen dauerhaft und unterstützt dieses beim Denkprozess. Mündet der Denkprozess in der Findung einer Entscheidung, wird nach einer Auswahl eine passende Reaktion getriggert. Die Ergebnisse der durchgeführten Reaktionen können über die Sinnesorgane wiederum direkt wahrgenommen werden.

Eine zentrale Komponente, die eine grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Informationsverarbeitung ist, umfasst die Aufmerksamkeit [50]. Unter Aufmerksamkeit versteht Wickens [7] den Vorrat mentaler Ressourcen. Aufmerksamkeitsressourcen sind einerseits tagesformabhängig und begrenzt verfügbar, auf der anderen Seite sind sie Voraussetzung für Prozesse aller drei Ebenen der menschlichen Informationsverarbeitung (Abb. 2-8). Sie stellen daher oftmals das limitierende Element in der beschriebenen Prozesskette dar. Deutlich wird dies vor allem dann, wenn mehrere Aufgaben parallel zu bearbeiten sind und Aufmerksamkeitsressourcen selektiv eingesetzt werden müssen.

Vorteilhaft sind daher Prozesse, die besonders wenige Aufmerksamkeitsressourcen erfordern. Diese werden auch als Automatismen bezeichnet. Bei Automatismen folgt auf den Wahrnehmungsprozess oftmals eine direkte Reaktionsauswahl ohne Aktivierung kognitiver Prozesse. Sie können daher besonders schnell durchgeführt werden.

Da für die Entwicklung eines Displayformats nur Prozesse der Wahrnehmungs- und Kognitionsebene relevant sind, wird die Aktionsebene in den folgenden Kapiteln nicht detaillierter betrachtet.

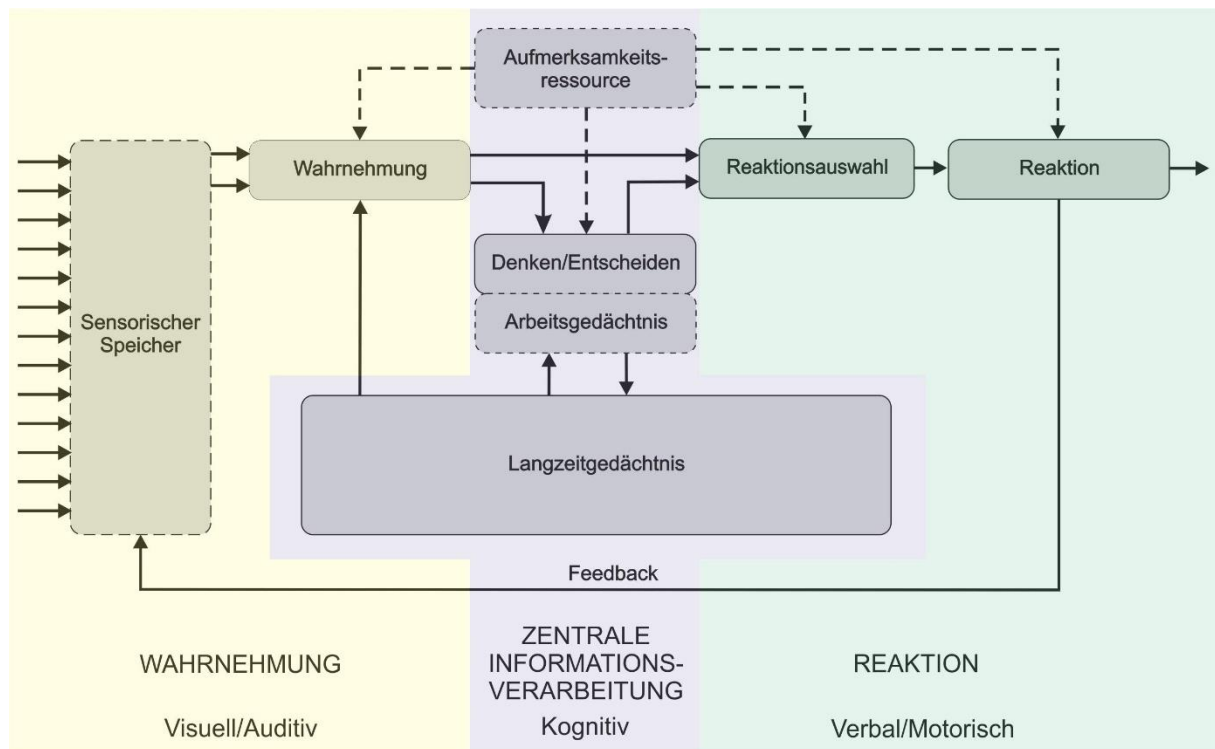


Abb. 2-8: Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung [7]

2.4.2. Visuelle Informationsaufnahme

Die Wahrnehmung unserer Umgebung erfolgt über verschiedene Sinnesmodalitäten. Aufgrund der Vielfältigkeit und Menge der erfassbaren Informationen, kommt dabei dem visuellen Sinneskanal eine herausragende Bedeutung zu. Der visuelle Sinneskanal nutzt Licht als Informationsträger durch Transformation elektromagnetischer Wellen in neuronale Signale [50]. Die Aufbereitung und Transformation der umgebenden optischen Felder erfolgt im Auge [51]. In diesem werden einfallende Lichtstrahlen durch die Hornhaut und die Linse so fokussiert, dass auf der Netzhaut ein scharfes, spiegelverkehrtes und kopfstehendes Abbild der Umgebung entsteht. Um Objekte verschiedener Entfernungen zu fokussieren, wird die Brennweite durch Änderung der Hornhaut- und Linsenform angepasst. Fotorezeptoren, die sich auf der Augenhaut, der sogenannten Retina, befinden, wandeln letztlich die Lichtsignale in bioelektrische Signale um und leiten sie über Nervenbahnen an das Gehirn weiter [50, S.41-S.80].

Entsprechend der Sehschärfe des Auges werden zwei verschiedene Sichtbereiche unterschieden: der foveale und der periphere oder ambiente Sichtbereich [52]. Der hochauflösende foveale Sichtbereich befindet sich in der Blicklinie des Auges und ist nur ca. 2° groß [53]. Er dient der Erfassung von Detailinformationen. Das Auflösungsvermögen beträgt hier circa eine Winkelminute, also $0,017^\circ$. Im peripheren Sichtbereich nimmt die Sehschärfe mit zunehmender Entfernung von der Fovea ab [54]. Das horizontale periphere Sichtfeld des Menschen beträgt für monokulares Sehen circa 200° und für binokulares Sehen circa 140° , das vertikale Sichtfeld beträgt circa 135° [55], [56]. Solch große Sichtwinkel sind erst durch die konkave Krümmung der kugelförmigen Augenhaut und die lichtbrechenden Eigenschaften der Hornhaut und Linse realisierbar. Aufgrund der geringeren Auflösung dient der periphere Sichtbereich nicht der Vermittlung von Detailinformationen, sondern der Bereitstellung eines groben Überblickes. Er ist sensitiv gegenüber Bildänderungen und unterstützt dadurch das Lenken von Aufmerksamkeit. Wird beispielsweise ein Reiz im peripheren Blickfeld erkannt, kann das foveale Blickfeld durch eine Augen- oder Kopfbewegung auf ihn gerichtet werden, um Detailinformationen wahrnehmen zu können. Erst durch dieses Zusammenspiel von fovealen und peripheren Sehen ist unser visuelles System in der Lage, sehr effizient zu arbeiten [54]. Die Anatomie des Menschen ermöglicht es dabei, das foveale Blickfeld in aufrechter Sitzposition durch kombinierte Kopf- und Augenbewegungen in einem Bereich von 190° in der Horizontal- und 160° in der

Vertikalebene zu variieren [57]. Für das periphere Blickfeld ergeben sich schließlich sogar Werte von 320° in der Horizontalebene und 240° in der Vertikalebene [55], [57].

Um Bewusstsein über das "Gesehene" zu erlangen, erfolgen im Gehirn weitere Schritte zur Verarbeitung des Retinabildes. Bei der Auswertung von Informationen über räumliche Tiefe oder geometrische Formen ist dabei neben physiologischen Effekten wie Konvergenz, Akkommodation und binokulare Disparität vor allem unsere Erfahrung von entscheidender Bedeutung [50]. Wir wissen beispielsweise, dass zwei geradlinige Eisenbahnschienen parallel zueinander verlaufen, obwohl sie sich in einem gemeinsamen Fluchtpunkt zu schneiden scheinen, oder dass ein verdecktes Objekt weiter entfernt ist, als das Objekt, durch das dieses verdeckt wird. Diese Erfahrung unterstützt uns bei der korrekten Abschätzung räumlicher Entfernungen und Winkel und somit bei der Orientierung in unserer dreidimensionalen Umwelt.

2.4.3. Wahrnehmung räumlicher Tiefe

Obwohl das auf die Netzhaut projizierte Abbild der Umgebung nur zweidimensional ist, ist der Mensch in der Lage, Tiefeninformationen daraus zu extrahieren. Verantwortlich dafür sind die monokulare⁸ und die binokulare⁹ Raumwahrnehmung [50].

Die binokulare Raumwahrnehmung beruht auf der Tatsache, dass der Mensch zwei Augen besitzt, die einen gewissen Abstand zueinander aufweisen. So entstehen in beiden Augen leicht verschiedene Bilder (Parallaxe), die Rückschlüsse auf die Entfernung von Objekten ermöglichen. Des Weiteren werden beim Fokussieren von Objekten (Konvergenz) die Augen über den Augenmuskel nach innen gelenkt. Bei geringen Objektentfernungen kann das Gehirn aus der erforderlichen Muskelanspannung Tiefeninformationen ableiten [50].

Die monokulare Raumwahrnehmung umfasst Aspekte, die das Ableiten von Tiefeninformationen mit nur einem Auge betreffen. In Abhängigkeit der Objektentfernung muss beispielsweise die Augenlinse zum Fokussieren unterschiedlich stark gekrümmt werden (Akkommodation). Des Weiteren erlaubt die menschliche Erfahrung räumliche Tiefe basierend auf den grafischen Eigenschaften des projizierten Abbildes zu interpretieren. Beispiele dieser sogenannten grafischen Tiefenschlüssel sind in Tab. 2-1 gelistet [50, S.228-S.235] und in Abb. 2-9 visualisiert. Grafische Tiefenschlüssel haben den Vorteil, dass sie ohne großen technischen Aufwand auf Displays zur Vermittlung von Tiefeninformationen implementiert werden können. Da sich ihre Anwendung allein programmiertechnisch realisieren lässt, sind grafische Tiefenschlüssel ein probates Mittel der Vieldeutigkeit zentralprojizierter Abbildung zu begegnen.

Tab. 2-1: Grafische Tiefenschlüssel [50]

Kategorie	Indikator
Statisch	Verdecken von Objekten (Abb. 2-9, (1)) Relative Höhe im Gesichtsfeld Relative Größe im Gesichtsfeld Atmosphärische Perspektive Gewohnte Größe von Gegenständen (Abb. 2-9, (2)) Linearperspektivische Skalierung (Abb. 2-9, (3)) Texturgradient
Bewegungsinduziert	Bewegungsparallaxe Fortschreitende Zu- oder Aufdeckung von Flächen

⁸ monokular: mit einem Auge

⁹ binokular: mit zwei Augen

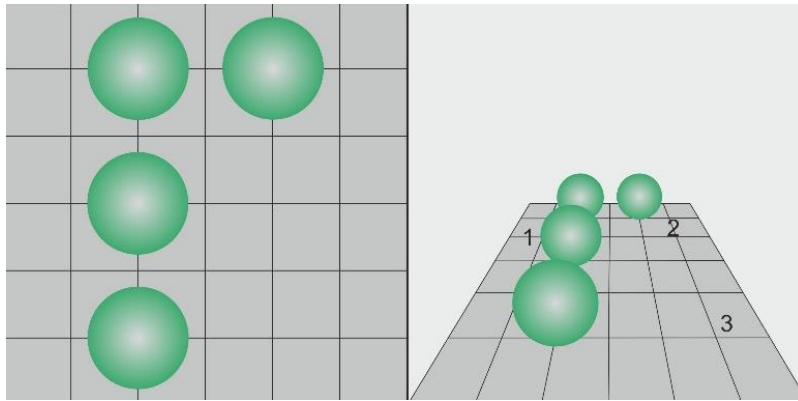


Abb. 2-9: Visualisierung der grafischen Tiefenschlüssel Verdecken von Objekten (1), gewohnte Größe von Gegenständen (2) und linearperspektivische Skalierung (3, sichtbar durch Konvergenz der Gitternetzlinien)

Alle in Tab. 2-1 gelisteten Tiefenschlüssel ermöglichen eine qualitative Beurteilung der räumlichen Tiefe. Bei Cockpitanwendung sind jedoch häufig quantitative Aussagen erforderlich, zum Beispiel zur Ermittlung dreidimensionaler Raumkoordinaten. Um auch die dritte Koordinatenkomponente quantitativ abschätzen zu können, sind zusätzliche metrische Skalen in perspektivische Abbildungen zu integrieren [58]. Dabei wird beispielsweise die absolute Entfernung, welche die Tiefe beschreibt, in eine horizontale und eine vertikale Komponente zerlegt. Als möglicher Bezug für die horizontale Entfernung kommt ein auf einer Ebene platziertes Gitternetz in Betracht, wohingegen durch eine Objektlotskala vertikale Längenmaße referenziert werden können. Je nach Wahl eines kartesischen oder polaren Gitternetzes können so über die Lotlänge und den Lotfußpunkt dreidimensionale Koordinatenkomponenten in kartesischer oder zylindrischer Form dekodiert werden.

Die Auflösung der Lotlinienskalen ist dabei nicht konstant, sondern abhängig von der horizontalen Entfernung des Objektes sowie der vertikalen Entfernung der Referenzebene. Lotfußpunkte zu nah gelegener Objekte können zudem in sogenannte Totwinkelbereiche fallen. Obwohl das Objekt an sich im Blickfeld liegt, ist eine quantitative Entfernungsbestimmung dann nicht zwingend möglich.

Des Weiteren wirkt sich der linearperspektivische Effekt auch auf Gitternetzlinien und Skalen aus. Durch Konvergenz und Kompression nimmt deren Auflösung mit zunehmender Entfernung ab. Dieses nichtlineare Verhalten hat daher einen unmittelbaren Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit beim Erfassen von Objektentfernungen. Weit entfernte Skalen werden sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Dimension unzureichend aufgelöst [48]. Die theoretisch unendlich tief abbildende Perspektive ist somit auf eine Maximalentfernung zu begrenzen.

2.4.4. Situationsbewusstsein

Eine grundlegende Voraussetzung für das menschliche Handeln ist ein Prozess zur Entscheidungsbildung [7], [59]. Dabei wird, basierend auf der subjektiven Einschätzung der aktuellen Situation und deren zukünftigen Entwicklung, zwischen verschiedenen Alternativen gewählt. Entsprechend der Tragweite der Entscheidung erfolgt dies spontan oder wohl überlegt.

In der Fliegerei kommt diesem Prozess eine besondere Bedeutung zu. Zum einen ist die Flugumgebung sehr komplex und hochdynamisch. Das Verständnis erfordert oftmals einen hohen Einsatz kognitiver Ressourcen. Die Entscheidungen müssen in der Regel zudem schnell getroffen werden. Zum anderen kann die Wahl einer falschen Alternative verheerende Konsequenzen haben. "Human Error" wird schließlich noch immer in den meisten Fällen als Hauptflugunfallursache ermittelt [2]. Ein gutes Verständnis der aktuellen Situation ist im Kontext der Fliegerei daher besonders wichtig.

Obgleich eine Vielzahl verschiedener Definitionen von Situationsbewusstsein existieren [60], hat sich in der Fachwelt vor allem die Beschreibung von Endsley [59] etabliert. Sie definiert Situationsbewusstsein als "the perception of the elements in the environment within a volume of time and space (1), the comprehension of their meaning (2) and the projection of their status in the near future (3)". Endsley beschreibt Situationsbewusstsein somit als ein Konstrukt, das aus drei verschiedenen Ebenen besteht [61]:

- Ebene 1, die Wahrnehmungsebene, umfasst die Aufnahme wichtiger Informationen aus der Umgebung,
- Ebene 2, die Verständnisebene, umfasst deren Kombination, Interpretation, Integration, Speicherung und Erhaltung
- Ebene 3, die Antizipationsebene, ist in die Zukunft gerichtet und umfasst die Projektion und Prognose zukünftiger Ereignisse

Die drei Ebenen sind kausal untereinander verknüpft, wobei die Ergebnisse der Wahrnehmungsebene als Eingangsgröße für die Verständnisebene dienen. Deren Ergebnisse wiederum dienen als Eingangsgröße für die Antizipationsebene [61]. Aufgrund der hierarchischen Struktur erfordern antizipative Prozesse den höchsten Einsatz kognitiver Ressourcen und verursachen eine hohe mentale Belastung, wie eine Pilotenbefragung von Kostka [62] für den operativen, militärischen Flugbetrieb belegt. Zusätzlich zu den drei verschiedenen Verarbeitungsebenen erwähnt Endsley [61] in ihrer Definition einen zeitlichen und räumlichen Rahmen, auf den sich Situationsbewusstsein bezieht. Wird dieser vollständig ausgefüllt, so wird dies durch das vorangestellte Attribut "global" in der Bezeichnung gekennzeichnet.

Entsprechend der relevanten Informationselemente kann Situationsbewusstsein verschiedene Ausprägungen besitzen. Endsley [2] nimmt dazu die folgende Kategorisierung vor:

- Geografisch
- Räumlich-Zeitlich
- System
- Umwelt
- Taktisch

Geografisches Situationsbewusstsein umfasst laut ihrer Definition neben der geografischen Position des eigenen Flugzeuges auch Positionen anderer Flugobjekte oder Wegpunkte, sowie den Verlauf des Geländes. Räumlich-Zeitliches Situationsbewusstsein beschränkt sich auf eigene Flugzeugparameter wie die drei Eulerwinkel, die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit, die Vertikalgeschwindigkeit oder die Ablage von einer Solltrajektorie. Unter System Situationsbewusstsein versteht Endsley die Kenntnis über den Status und die Einstellungen von Flugzeugsystemen, wohingegen Umweltsituationsbewusstsein Wetterbedingungen wie Bewölkung, Temperaturen, Windgeschwindigkeiten oder Sichtweiten beschreibt. Taktisches Situationsbewusstsein beinhaltet Aspekte, die für militärische Anwendungen relevant sind, wie flugdynamische Eigenschaften anderer Objekte und deren Gefährdungspotential, sowie das eigene Aktionspotential.

Der kausale Zusammenhang einzelner Komponenten des Entscheidungsbildungsprozesses wird in Abb. 2-10 verdeutlicht [63]. Man erkennt eine enge Verknüpfung mit dem in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Informationsverarbeitungsprozess. Ferner wird deutlich, dass personengebundene Faktoren, wie Erfahrung oder Training, den Informationsverarbeitungsprozess beeinflussen. Aufgaben- oder systemabhängige Einflussfaktoren, wie das Schnittstellendesign oder die Arbeitsbelastung, wirken sich hingegen direkt auf den Entscheidungsbildungsprozess aus. Obgleich die Arbeitsbelastung Situationsbewusstsein beeinflusst, ist der Zusammenhang nicht immer gleich gerichtet [63]. Hohe Arbeitsbelastung bedeutet demnach nicht zwingend schlechtes Situationsbewusstsein. Umgekehrt muss eine niedrige Arbeitsbelastung nicht hohes Situationsbewusstsein zur Folge haben. Erfolgt hingegen eine Arbeitsüberlastung, ist sehr wohl von einem reduzierten Situationsbewusstsein auszugehen.

Die Komponenten Situationsbewusstsein und Entscheidungsfindung werden zudem durch persönliche Ziele und Erwartungen beeinflusst. Beispielsweise beurteilt ein Operator mit einer positiven Grundeinstellung oder einem positiven Erfahrungshintergrund eine Situation wahrscheinlich anders, als ein Operator, bei dem diese individuellen Faktoren negativ belegt sind.

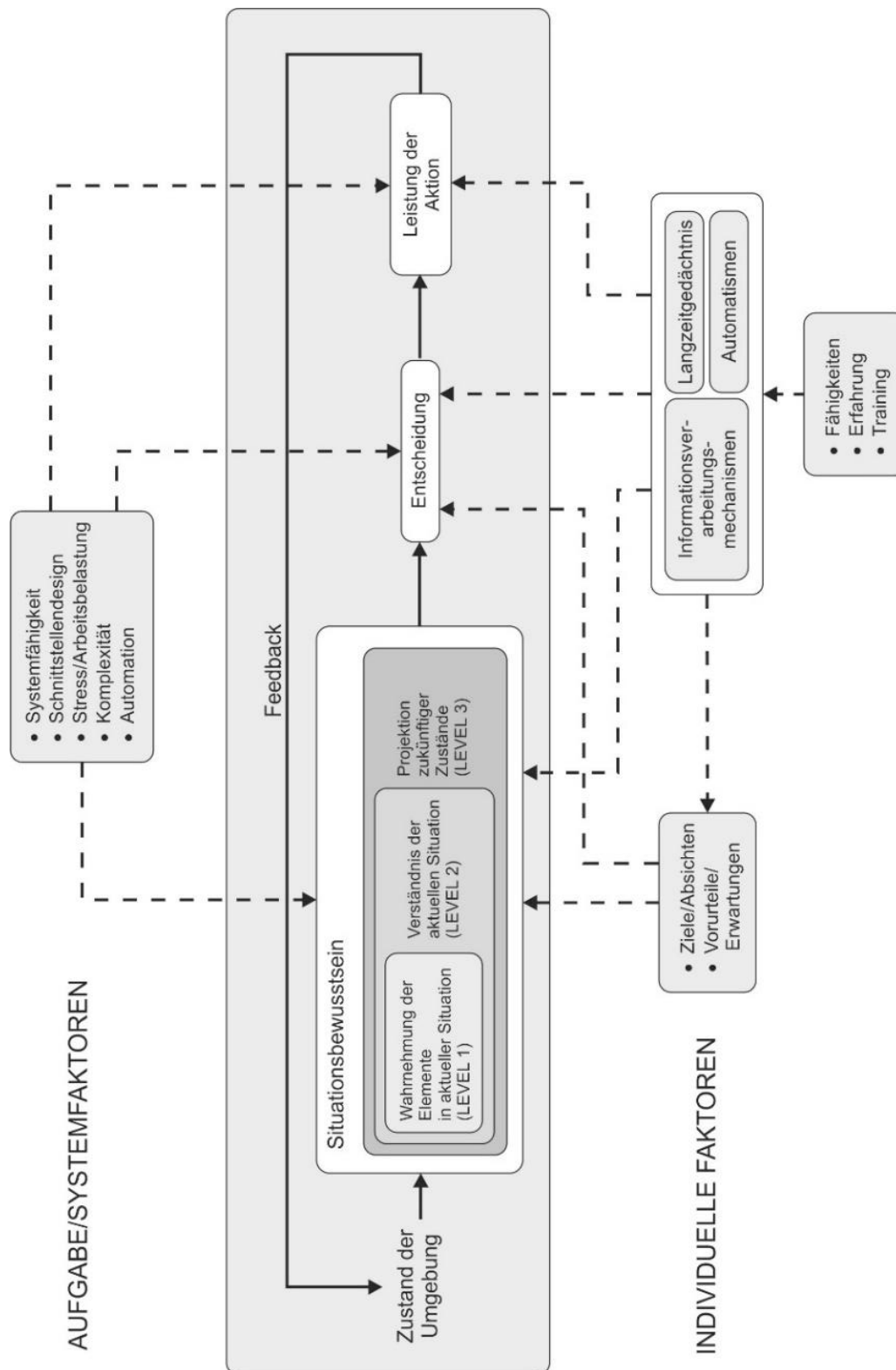


Abb. 2-10: Entscheidungsbildungsprozess [63]

2.5. Wissenschaftliche Untersuchungen zu räumlichen Darstellungen

Im Folgenden werden relevante wissenschaftliche Untersuchungen zur Darstellung von räumlichen Informationen aufgearbeitet, deren Erkenntnisse als Grundlage bei der Entwicklung des neuartigen Raumformates dienen.

2.5.1. Displaygröße

Dass mit großflächigen Displays mehr Informationen dargestellt werden können, liegt in der Natur der Sache und wurde in Kapitel 2.2.2 bereits beschrieben. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten kommen vor allem bei der Verwendung räumlicher Formate zum Tragen. Da große Raumsegmente auf großflächigen Displays mit einer vergleichsweise hohen Auflösung dargestellt werden können, ist es möglich, gleichzeitig Detail- und Übersichtsinformationen mit der Anzeige zu erfassen. Dies gilt für parallel und zentral projizierte Abbildungen gleichermaßen. So können bei gleichbleibender Skalierung, auch Display to World Ratio genannt, Kartenausschnitte oder Blickfelder vergrößert [64] und dadurch Zoom- oder Umschaltaktivitäten zur Anpassung der Skalierungstufe reduziert werden. Mentale Anstrengungen zur Integration der verschiedenen Skalierungsstufen werden minimiert.

Bei egozentrischen perspektivischen Abbildungen können große Blickfelder in Kombination mit einer großflächigen Darstellung zudem zu einer erhöhten Immersion beitragen [65]. Der Beobachter fühlt sich dadurch stärker in die virtuelle Umgebung hineinversetzt. Untersuchungen von Alexander [66] und Muthard [64] deuten ferner auf eine erhöhte Leistung beim manuellen Fliegen entlang einer Trajektorie für größere Winkelmaßstäbe hin, wenn diese mit größeren Displays realisiert wurden. Da bei zu kleinen Winkelmaßstäben, wie sie häufig bei kleinen Displays der Fall sind, die Wahrnehmungsschwelle von Abweichungen hoch ist, werden Trajektorienablagen unterschätzt, was verzögerte Korrektüreingaben zur Folge hat.

Laut Tan [67] unterstützen großflächige Darstellungen auch die Leistung bei 3D-Navigationsaufgaben. Dies erfolgt sogar dann, wenn der Blickwinkel konstant gehalten wird, indem die Entfernung zwischen Betrachter und dem größeren Display entsprechend erhöht wird. Tan's Vermutung für diesen Effekt ist, dass die für die Aufgabenbewältigung zu bevorzugende egozentrische Rotationsstrategie durch die erhöhte Immersion der großflächigen Darstellung häufiger gewählt wurde. Bei egozentrischen Rotationsstrategien werden Objekte selbst und nicht die Umgebung rotiert.

Da auf einem großflächigen Head Down Display Rauminformationen unabhängig von der Kopfbewegung dargestellt werden, ist diese Displayart in vielen Belangen auch den HMDs überlegen. Dies betrifft beispielsweise Aufgaben wie das manuelle Fliegen entlang einer Solltrajektorie in einer Kurve [68].

2.5.2. Dimension

Die Suche nach der geeigneten Dimension von Raumformaten hat unzählige Forschungsarbeiten hervorgebracht [69]. Eine eindeutige Empfehlung über eine grundsätzliche Eignung einer zweidimensionalen, orthografischen oder dreidimensionalen, perspektivischen Ansicht lässt sich aus diesen jedoch nicht ableiten [70]. Der Grund hierfür ist laut St. John [69] in der Verschiedenartigkeit der in den jeweiligen Studien untersuchten Aufgaben zu finden. Die Aufgaben spiegeln dabei den Kontext von Anwendungen verschiedenster Domänen wieder. Ferner ist der interferierende Einfluss zusätzlicher Darstellungsparameter, wie die Wahl des Bezugssystems (Kap. 2.5.3) oder in die Darstellung integrierte Tiefenschlüssel (2.5.5) zu berücksichtigen.

Vergleiche zwischen zweidimensionalen und perspektivischen Ansichten gestalten sich schwierig, da der Informationsgehalt zweidimensionaler Ansichten niedriger ist als der von dreidimensionalen, perspektivischen Darstellungen. Um alle Dimensionen abzubilden, muss bei zweidimensionalen Darstellungen stets auf mindestens zwei Ansichten zurückgegriffen werden. Sofern zwei zweidimensionale Ansichten alle drei Raumdimensionen abbilden, spricht man von einem koplanaren Displayformat [71]. Alternative Möglichkeiten die dritte Raumdimension durch Zusatzkodierungen wie Farb-

abstufungen oder alphanumerische Zahlenwerte zu integrieren, werden aufgrund des erhöhten mentalen Dekodierungsaufwandes an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Perspektivische Darstellungen besitzen eine große Popularität, da sie die Charakteristik des menschlichen visuellen Sinnessystems sehr gut widerspiegeln [72]. Sie entsprechen dem Prinzip des bildhaften Realismus [73], fördern das Eintauchen in eine virtuelle Umgebung, sind natürlich, integriert, aber auch vieldeutig und notwendigerweise verzerrend [69]. Daher sind sie nicht für alle Anwendungen geeignet. Studien über subjektive Nutzermeinungen deuten ungeachtet der genannten Defizite jedoch auf eine verbreitete Präferenz gegenüber nicht perspektivischen Darstellung hin [74].

Tittle [75] fasst die Ergebnisse verschiedener Studien zur Untersuchung der erzielbaren Wahrnehmungsgenauigkeit mit koplanaren und perspektivischen Darstellungen in tabellarischer Form zusammen. Sie zeigen, dass die erzielbare Leistung mit perspektivischen Abbildungen für die Erfassung der Maße relative Tiefe, Orientierung und Krümmung schlechter ist als bei nichtperspektivischen. Begründen lässt sich die schlechtere Performanz mit der Vieldeutigkeit und der Achsenkompression perspektivischer Abbildungen, die eine exakte Referenzierung erschweren. Erfordert eine Aufgabe also eine hohe Präzision, sind koplanare Displayformate zu bevorzugen.

Untermauert wird diese Aussage durch eine Studie von St John [76], in der die Aufgabe der Testpersonen darin bestand, Relativpositionen zu ermitteln. Er zeigt, dass die dabei erzielbare Genauigkeit mit perspektivischen Abbildungen geringer ist als mit nichtperspektivischen. Gestützt werden die Ergebnisse durch eine ähnliche Studie von Tory [77]. Sie kommt jedoch auch zu dem Schluss, dass perspektivische Darstellungen zur groben Abschätzung von Relativpositionen durchaus geeignet sein können.

Eine besondere Eignung besitzen perspektivische Abbildungen vor allem dann, wenn mit ihr komplexe und integrative Fragen zu beantworten sind [78]. Dies ist zum Beispiel beim Verständnis von Objektformen der Fall. In Untersuchungen von St John [69], [76] bezog sich die zu bearbeitende Aufgabe auf die Identifikation und mentale Rotation von Objekten, die durch integrierte Darstellungen besonders unterstützt werden.

Im Kontext der Fliegerei erweisen sich perspektivische Darstellungen im Vergleich zu koplanaren vor allem bei der Durchführung von Zielführungs- [79], [70] und Navigationsaufgaben [75] als vorteilhaft. Da bei diesen Aufgaben sowohl vertikale als auch laterale Abweichungen zu berücksichtigen sind, erfordert auch diese Aufgabe die Integration von Informationen. Der große Vorteil der perspektivischen Darstellung kommt dabei vor allem beim Landeanflug [80], [81] und bei der Prävention von CFIT Unfällen zum Tragen [82].

Neben Flugführungsanzeigen eignen sich perspektivische Darstellungen entsprechend Thomas [83] auch als Cockpit Display of Traffic Information (CDTI). Sie stellte fest, dass Konfliktvermeidungsmanöver mit perspektivischen Darstellungen genauso gut möglich sind wie mit koplanaren. Ergebnisse einer ähnlichen Studie [84] deuten darauf hin, dass bei hohem Verkehrsaufkommen perspektivische Darstellungen koplanaren sogar überlegen sein können. Begründet wird dies mit dem enormen Anstieg der visuellen Such- und Integrationskosten bei koplanaren Darstellungen mit Zunahme der Objektanzahl. Rabl [85] kommt bei einer Untersuchung des Pilotenblickverhaltens bei der Interaktion mit mehreren zweidimensionalen Ansichten zu einem ähnlichen Ergebnis. Er empfiehlt daher die Anwendung integrierter bzw. perspektivischer Darstellungen.

Im Bereich militärischer Anwendungen verglich Bemis [86] eine taktische perspektivische Anzeige mit einer taktischen koplanaren Anzeige. Sie stellte fest, dass sowohl die Fehler als auch die Antwortzeiten bei der Detektion von Bedrohungen unter Verwendung einer perspektivischen Darstellung reduziert werden. Van Breda [87] untersuchte eine Radaranzeige auf der ein bestimmtes Ziel zu erfassen und abzufangen war. Auch dies erfolgte mit einer perspektivischen Anzeige schneller als mit einer koplanaren Darstellung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Frage nach der passenden Dimension der Abbildung nicht trivial zu beantworten ist. Je nach Art der zu bearbeitenden Aufgabe ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Visualisierung räumlicher Informationen. Sowohl koplanare als auch perspektivische Darstellungen besitzen jeweils positive und negative Eigenschaften. Die Wahl entspricht

somit immer einer Abwägung innerhalb des sogenannten Speed Accuracy Tradeoffs. Liegt der Fokus auf dem präzisen Erfassen einzelner räumlicher Objektattribute, sind koplanare Darstellungen zu bevorzugen. Spielt die Präzision bei der Erfassung jedoch eine untergeordnete Rolle und sollen stattdessen Such- und Integrationskosten minimiert werden, ist die Verwendung perspektivischer Darstellungen zu empfehlen. Dies gilt vor allem dann, wenn die Anzahl der zu erfassenden Objekte hoch ist.

2.5.3. Bezugssystem

In Kapitel 2.3.3.1 wurde bereits erläutert, dass verschiedene Bezugssysteme zur Positionierung, Ausrichtung und Bewegung der bilderzeugenden Einheiten verwendet werden können. Wie aus zahlreichen Untersuchungen hervorgeht, hat die Art der zu bearbeitenden Aufgabe maßgeblichen Einfluss auf die Wahl des Bezugssystems. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich neben Fluglage- und Kartendisplays vor allem auf perspektivische Abbildungen. Das aufgabenübergreifende Ziel ist dabei stets die Minimierung mentaler Transformationen, um kognitive Ressourcen des Piloten zu schonen.

2.5.3.1. Fluglagedisplay

Fluglagedisplays dienen der Visualisierung von Nick- und Rollwinkel des zu führenden Fluggeräts. Sie werden entsprechend der Ausrichtung ihres Bezugssystems in Inside-Out (Abb. 2-11) und Outside-In (Abb. 2-12) Darstellungen unterschieden. Inside-Out Darstellungen basieren auf egozentrischen, also flugzeugreferenzierten Bezugsrahmen. Das auf dem Display abgebildete Flugzeugsymbol verhält sich statisch. Der Horizont bewegt sich hingegen und indiziert die relative Fluglage um die Flugzeuglängs- und Flugzeugquerachse. Bei der Outside-In Darstellung, dessen Bezugssystem eine weltreferenzierte Orientierung besitzt, verhält es sich umgekehrt.

Fluglagedisplays westlicher Hersteller operieren zumeist entsprechend dem Inside-Out Konzept, obwohl einige Studien darauf hinweisen, dass das Outside-In Konzept besser geeignet sei [88]. Dies gilt beispielsweise im Hinblick auf die Vermeidung von Roll Reversal Errors für untrainierte Novizen. Bei einem Roll Reversal Error wird das Flugzeug in die falsche Richtung um die Rollachse gedreht.

Als mögliche Ursache bei der Vermeidung dieser Fehlerart wird das "Prinzip des bewegten Elementes" genannt [73]. Dieses Prinzip besagt, dass sich Elemente, die sich in der Realität bewegen, auch auf dem Display bewegen müssen. Im Gegensatz zu Inside-Out Displays entsprechen Outside-In Displays diesem Prinzip. Des Weiteren weisen Outside-In Displays eine Steuer-Display Kompatibilität auf. Die Richtung der Steuereingaben entspricht dabei der Bewegungsrichtung des Indikators auf dem Display [89]. Dadurch werden insbesondere Recovery Maßnahmen aus ungewohnten Fluglagen unterstützt.

Der Vorteil der Inside-Out Darstellung liegt hingegen darin, dass diese mit dem Blick aus dem Cockpitfenster konform ist. Mentale Rotationen, um Kompatibilität zwischen Displayinhalt und dem Blick nach draußen herzustellen, entfallen. Die Richtung der Steuereingaben ist der Bewegungsrichtung des Indikators auf dem Display entgegengesetzt [89].

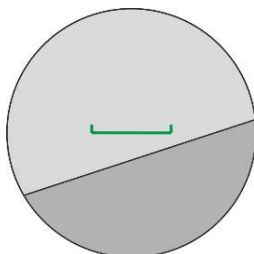


Abb. 2-11: Inside Out Display – egozentrische Darstellung

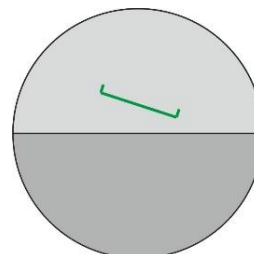


Abb. 2-12: Outside In Display – weltreferenzierte Darstellung

Es wird deutlich, dass beide Philosophien bestimmte Vor- und Nachteile besitzen. Aus diesem Grund kommen, je nach Herkunftsland des Flugzeugtyps, beide Displayarten zum Einsatz. Während bei westlichen Flugzeugherstellern Inside-Out Displays verbaut werden, verwenden Hersteller aus Ländern der ehemaligen GUS Outside-In Displays.

2.5.3.2. Kartendisplay

Die Bezugssysteme von Kartendisplays können in der Positionierung und in der Zentrierung, also ihrer Ausrichtung, variiert werden. Eine erdfeste nach Norden ausgerichtete Karte (north up fixed) besitzt einen reinen Weltbezug, eine flugzeugfeste in Flugrichtung ausgerichtete Karte (track up moving) hingegen einen reinen Beobachterbezug. Ein flugzeugfestes nach Norden ausgerichtetes Kartendisplay beschreibt eine Mischform zwischen egozentrisch referenzierten und weltreferenzierten Bezugssystem.

Der Fokus vergangener Forschungsarbeiten lag vor allem auf der Untersuchung des Einflusses der Ausrichtung von Karten. Entsprechend Olmos [90], Rate [49] und Prevett [48] eignen sich in Flugrichtung ausgerichtete Kartendarstellungen für lokale Flugführungsaufgaben. Laterale Abweichungen von einer Solltrajektorie werden auf die Kontrollachse bezogen richtungstreu abgebildet. Ähnliches gilt für die Abschätzung relativer Peilwinkel [91], [92]. Dadurch werden mentale Rotationen, um die Kartendarstellung in Blickrichtung zu überführen, obsolet. Klatzky [93] beschreibt die Vorteile dieser Darstellungsform mit sogenannten primitiven Parametern. Primitive Parameter werden aus der Darstellung durch die Displayposition direkt vermittelt und sind somit besonders leicht erfassbar [94]. Im Gegensatz dazu müssen abgeleitete Parameter in einen oder mehreren mentalen Transformationsschritten aus den primitiven Parametern bestimmt werden. Sowohl Aretz [95] als auch Wickens [96] empfehlen daher in Flugrichtung orientierte Karten als Standardkonfiguration.

Nach Norden ausgerichtete Karten unterstützen hingegen die Suche und Identifikation von Landmarken [97]. Des Weiteren erleichtern sie die Kommunikation mit anderen Piloten [92] und die Erfassung des eigenen Kurswinkels, der bei dieser Darstellungsart als primitiver Parameter abgebildet wird. Sie eignen sich besonders für die Erkundung unbekannter Gebiete und die mentale Rekonstruktion von Karten [98].

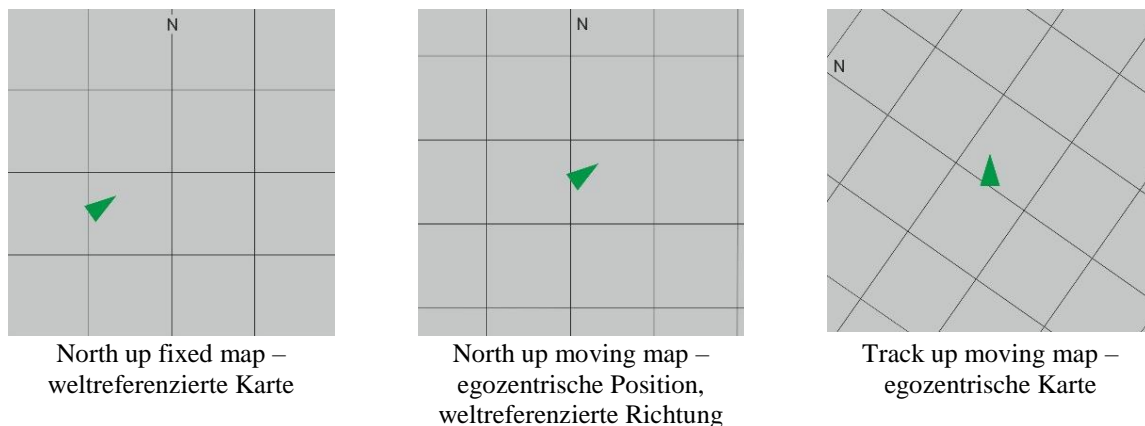


Abb. 2-13: Bezugsrahmen von Kartendisplays

Bezüglich der Mitführung von Kartendisplays liegt der Vorteil von Karten mit flugzeugfesten Bezugsrahmen auf der Hand. Diese sogenannten Moving Maps bilden durch die kontinuierliche Anpassung des Kartenausschnittes auch bei kleinen Skalierungen jederzeit die unmittelbare Flugzeugumgebung ab. Sie eignen sich daher zur Durchführung von Aufgaben mit lokaler Referenz.

Nicht mitgeführte Karten, sogenannte Fixed Maps, zeigen hingegen unabhängig der eigenen Position immer den gleichen Abschnitt der Erdoberfläche. Durch den globalen Bezug eignen sie sich für Aufgaben, bei denen die eigene Position untergeordnetes Interesse besitzt, wie beispielsweise die Observierung von Lufträumen. Das Bezugssystem eines Kartendisplays ist heute in der Regel frei konfigurierbar.

2.5.3.3. Perspektivisches Display

Wie in Kapitel 2.3.3.1 beschrieben, werden perspektivische Darstellungen je nach Wahl des Bezugssystems der virtuellen Kamera als egozentrisch, heterozentrisch oder exozentrisch bezeichnet. Bei einer rein egozentrischen Abbildung befindet sich die virtuelle Kamera im Blickpunkt des Beobachters, ist in dessen Blickrichtung ausgerichtet und wird mit seiner Bewegung mitgeführt. Bei einer rein exozentrischen Abbildung sind all diese Attribute beobachterunabhängig. Heterozentrische Darstellungen bilden Mischformen aus beiden, die verschiedene Ausprägungen besitzen können [47].

Egozentrische Perspektiven sind vertraut, immersiv und bilden ab, was der Pilot von seinem Blickpunkt aus sieht [99]. Sie werden daher auch als pilotenreferenziert bezeichnet. Durch die Kongruenz von Blick- und Flugrichtung werden laterale und vertikale Ablagen von einer Trajektorie sowie der eigene Roll- und Nickwinkel eindeutig und nicht komprimiert abgebildet [100]. Die Richtung von Steuereingaben und die aus der Flugzustandsänderung resultierende Bewegungsrichtung des Displayinhaltes sind, analog der Inside-Out Fluglagedisplays (Kap. 2.5.3.1), gegenläufig.

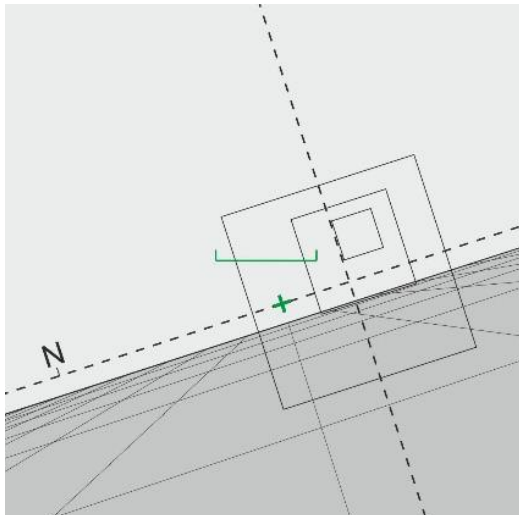
Aufgrund der genannten Eigenschaften eignen sich egozentrische Darstellungen besonders zur Durchführung manueller Flug- [70], [48], [79], [99] und Zielführungsaufgaben [101], [102]. Während die manuelle Flugführungsaufgabe das sichere Steuern eines Flugzeuges entlang einer Solltrajektorie umfasst, werden unter Zielführungsaufgaben militärische Operationen wie Zielerfassung (Acquisition) oder das Abfangen von Zielen (Interception) verstanden. Die gute Eignung bezüglich der manuellen Flugführungsaufgaben wurde von Wickens [103] auch bei der Wiederherstellung einer sicheren Fluglage aus einem unkontrollierten Flugzustand nachgewiesen.

Aufgrund der pilotenreferenzierten Blickrichtung werden durch egozentrische Perspektiven horizontale und vertikale Peilwinkel eindeutig und mit hoher Auflösung [70] dargestellt. Wird in die Perspektive ein virtuelles Abbild des Geländes integriert, eignet sich die Darstellungsform auch zur Generierung von Terrain Awareness [104]. Der Pilot kann dabei leicht abschätzen, welche Fluglage einzunehmen ist, um ausreichend Distanz zu einem möglichen Hindernis zu wahren. Des Weiteren eignen sich egozentrische Perspektiven zur Darstellung von Raumsegmenten mit egozentrischem Bezug. So können Kamera-, Radar- und Infrarotbilder verständlich in die Darstellung integriert werden.

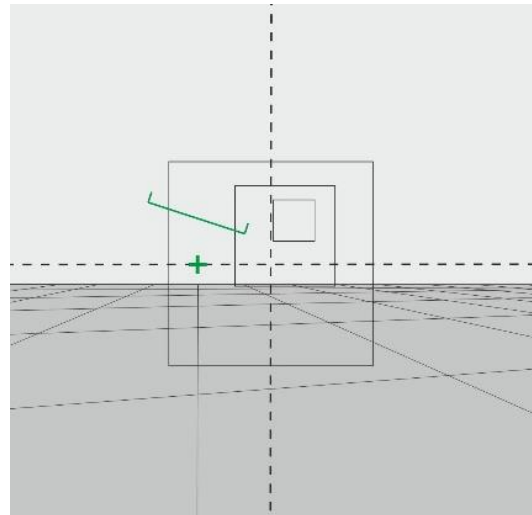
Egozentrische Abbildungen sind laut Wickens [104] immer dann zu verwenden, wenn Fragen mit einem egozentrischen Bezug zu beantworten sind. Dies betrifft auch die Ermittlung von Objektrelationen (Relativpositionen und –geschwindigkeiten) in Bezug auf das eigene Fluggerät.

Ein Nachteil egozentrischer Abbildungen wird durch den sogenannten "Keyhole-Effekt" beschrieben [99]. Durch das beschränkte Blickfeld der virtuellen Kamera ist, ähnlich dem Blick durch ein Schlüsselloch, nur ein beschränkter Ausschnitt der Umgebung sichtbar. Elemente außerhalb dieses Ausschnittes können nicht wahrgenommen werden. Aus diesem Grund eignen sich egozentrische Darstellungen nicht zur Vermittlung von globalen Situationsbewusstsein [105]. Außerdem induzieren egozentrische Darstellungen durch ihre starke Immersion "kognitives Tunneling" [105]. Unter kognitiven Tunneling versteht man laut Thomas [106] einen Effekt, "bei dem der Beobachter dazu tendiert, die Aufmerksamkeit auf Informationen bestimmter Displaybereiche zu fokussieren, ohne Bereiche außerhalb zu berücksichtigen."

Heterozentrische Perspektiven mit egozentrischer Positionsreferenz und exozentrischer Lagereferenz besitzen ähnliche Eigenschaften wie rein egozentrische Perspektiven. Da vertikale und horizontale Ablagen mit dieser Darstellungsart sehr hoch und eindeutig aufgelöst werden, ist auch dieses Bezugssystem für die manuelle Flugführung sehr gut geeignet. Im Unterschied zur rein egozentrischen Perspektive, die der Philosophie eines Inside-Out Displays folgt, entspricht diese Art der heterozentrischen Perspektive einem Outside-In Display (Abb. 2-14).



Egozentrischer Perspektive (Inside-Out)



Heterozentrische Perspektive mit egozentrischer Positionsreferenz (Outside-In)

Abb. 2-14: Perspektivische Darstellung der horizontalen und vertikalen Ablagen von einer Solltrajektorie

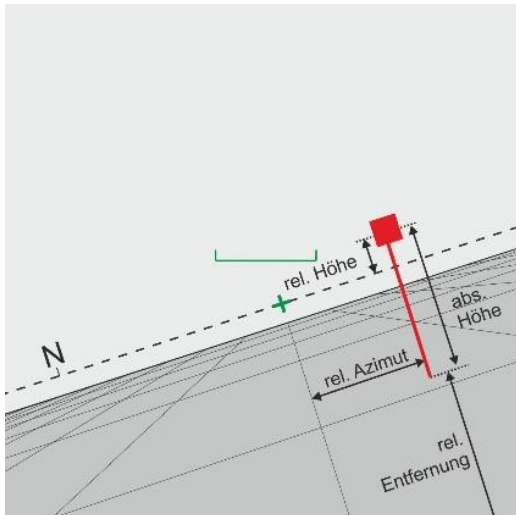
Rein exozentrische Darstellungen beschreiben einen Blick von "Außen" auf die Szenerie. Die virtuelle Kamera ist dabei typischerweise oberhalb des eigenen Flugzeuges platziert, um dieses zusammen mit dem Untergrund abzubilden [100]. Der das eigene Flugzeug unmittelbar umgebende Luftraum kann so in allen Richtungen visualisiert werden. Aufgrund der hohen Übersichtlichkeit werden solche Darstellungen auch God's Eye oder Bird's Eye Ansichten genannt [70]. Sie zeichnen sich durch ihre Eignung für Aufgaben mit exozentrischen Bezug [94] und ihre gute Verständlichkeit aus [7].

Neben rein exozentrischen Abbildungen, bei denen die Position der virtuellen Kamera weltreferenziert ist, werden auch Darstellung mit gebundenen ("tethered") Bezugssystemen als exozentrisch bezeichnet (Kap. 2.3.3.1). Bei diesen wird die virtuelle Kamera in einem bestimmten Abstand zum Beobachter mit dessen translatorischer Bewegung mitgeführt. Strenggenommen handelt es sich somit eigentlich um eine heterozentrische Perspektive.

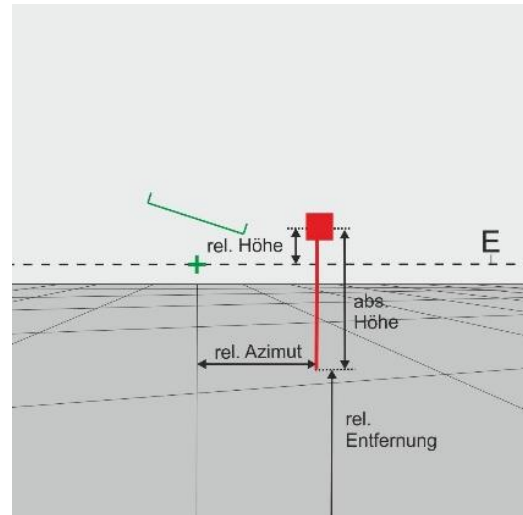
Im Gegensatz zu Darstellungen mit egozentrischen Bezugssystemen eignen sich reine oder gebundene, exozentrische Darstellungen zur Vermittlung von globalen Situationsbewusstsein [90], [48], [70], [105]. Sie besitzen keinen Keyhole-Effekt, weshalb die Umgebung des eigenen Flugzeuges bei geschickter Parameterwahl ohne Einschränkung wahrgenommen werden kann. Daher werden durch diese Darstellungsart Suchaufgaben unterstützt [101]. Des Weiteren unterstützen exozentrische Perspektiven die Beantwortung von Fragen mit Weltbezug. So lassen sich beispielsweise exozentrische Maße, also Entfernungen und Winkel zwischen zwei externen Objekten, leicht erfassen [104], [93]. Die Kommunikation mit Piloten, Lotsen oder anderen Personen, die keinen Zugang zur eigenen egozentrischen Perspektive besitzen [70], wird dadurch erleichtert. Ferner wird die mentale Rekonstruktion von Karten unterstützt [102].

Lokale Flugführungsaufgaben werden durch exozentrische Darstellungen hingegen vergleichsweise schlecht unterstützt [70], [48]. Während horizontale und vertikale Ablagen sowie Fluglagewinkel bei egozentrischen Perspektiven eindeutig und hoch aufgelöst abgebildet werden, sind diese mit exozentrischen Perspektiven nur schwer zu erfassen. Neben einer schlechten Auflösung liegt dies an der Vieldeutigkeit dieser Parameter [100], die entsprechend der Positionierung der virtuellen Kamera unterschiedlich starke Ausprägungen besitzen. Bei rein exozentrischen Darstellungen sind zudem aufwendige mentale Transformationen erforderlich, um anhand der Visualisierung des Flugzustandes Steuereingaben abzuleiten.

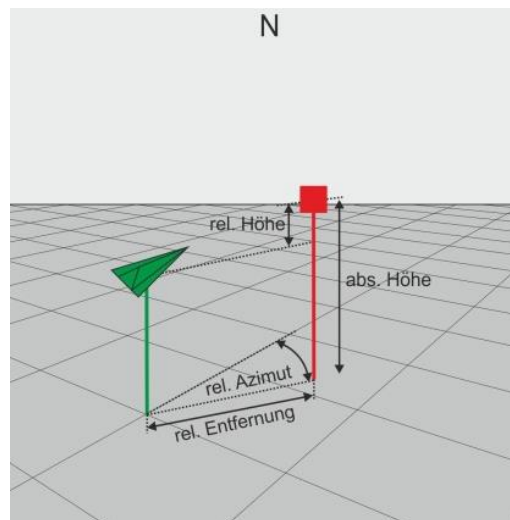
Ein weiteres Problem exozentrischer Darstellungen beschreibt die doppelte Vieldeutigkeit [107]. Das heißt, sowohl das eigene Flugzeugsymbol, als auch externe Objektsymbole werden vieldeutig abgebildet und erschweren die Ermittlung egozentrischer Relativpositionen. Diese lassen sich aus egozentrischen und einigen heterozentrischen Perspektiven hingegen vergleichsweise leicht erfassen, da die eigene Position nicht erst abgeleitet werden muss (Abb. 2-15).



Egozentrische Perspektive – einfache Vieldeutigkeit



Heterozentrische Perspektive – einfache Vieldeutigkeit



Exozentrische Perspektive – zweifache Vieldeutigkeit

Abb. 2-15: Darstellung von egozentrischen Relativpositionen

Die Positionierung und Ausrichtung der virtuellen Kamera verdienen bei exozentrischen Darstellungen eine gesonderte Betrachtung [49]. Durch den Abstand von Beobachterposition zu der eigenen Position werden perspektivische Ansichten indirekt skaliert. Je weiter weg die Kamera positioniert ist, desto größer ist bei konstanten GFOV das dargestellte räumliche Segment, aber desto niedriger ist auch dessen Auflösung (siehe 2.3.3.2). Hinsichtlich der Ausbildung und Wahrung von globalem Situationsbewusstsein ist die Kameraentfernung entsprechend der Größe des interessierenden Raumsegmentes in Abstimmung mit dem GFOV einzustellen. Bei axonometrischen Abbildungen kann dies durch die Skalierung der Bildachsen erfolgen.

Durch die Ausrichtung der virtuellen Kamera wird die Projektionsrichtung festgelegt. Sind Höheninformationen von primärem Interesse, ist aufgrund der Achsenkompression ein geringer Neigungswinkel zu wählen. Liegt der Fokus auf lateralen Abständen, ist ein großer Neigungswinkel einzustellen. Einen Kompromiss stellen mittlere Neigungswinkel dar. Bei einem Vergleich perspektivischer Darstellungen mit vertikalen Kameraausrichtungen von 30° und 60° gegenüber der Erdoberfläche ermittelte Barfield [102] sowohl für Zielführungsaufgaben als auch für mentale Rekonstruktionsaufgaben einen Leistungsvorteil für den 60° Neigungswinkel.

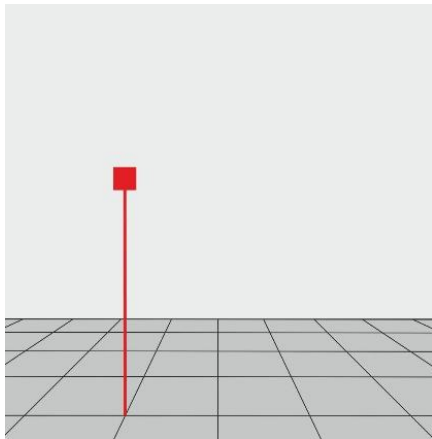
Die Diskussion über die Wahl eines rein exozentrischen oder eines gebundenen, exozentrischen Rahmens (tethered) kann analog zu den Bezugsrahmen bei Kartendisplays geführt werden. Durch den rein exozentrischen Rahmen wird dabei eine perspektivische Ansicht einer weltreferenzierten Karte

beschrieben, durch den gebundenen, exozentrischen Rahmen eine perspektivische Ansicht einer egozentrisch referenzierten Karte. Untersuchungen ergaben, dass gebundene, exozentrische Rahmen durch die Kopplung an die Beobachterposition für lokale Flugführungs- [101] oder aber auch Zielführungsaufgaben [87] besser geeignet sind als rein exozentrische Darstellungen. Für globale Betrachtungen sind hingegen Ansichten mit rein exozentrischen Bezugssystemen zu bevorzugen.

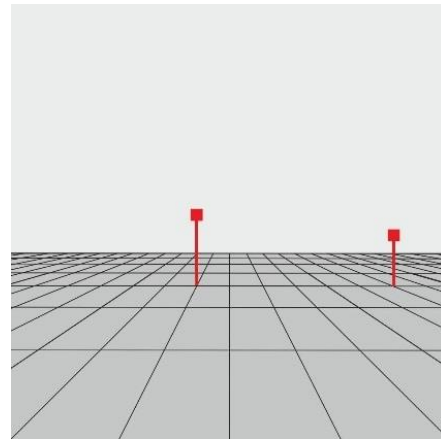
2.5.4. Größe des Blickfeldes

Die Beantwortung der Frage eines geeigneten Blickfeldes für perspektivische Abbildungen war ebenso wie die Suche nach der passenden Dimension und des Bezugssystems bereits Schwerpunkt vieler Forschungsarbeiten. Auch hier wurden verschiedene Anwendungsfälle zu Grunde gelegt, weshalb die erzielten Ergebnisse nur bedingt verallgemeinerte Schlüsse erlauben.

Konsens herrscht in der Fachwelt zumindest darüber, dass große Blickfelder das mentale „Eintauchen“ in die virtuelle Umgebung bzw. die Immersion fördern können [108], [109]. Das heißt, Operateure können sich bei Abbildungen mit großen Blickfeldern leichter in ein räumliches Szenario hineinversetzen als bei Abbildungen mit kleinen. Bei kleinen Blickfeldern wirkt sich zudem der "Keyhole Effekt" noch stärker aus, weshalb dem Operateur große Bereiche der Umgebung vorenthalten werden. Dies wird durch die in Abb. 2-16 visualisierten Beispiele verdeutlicht.



Schmales geometrisches Blickfeld (GFOV = 40°)



Breites geometrisches Blickfeld (GFOV = 120°)

Abb. 2-16: Geometrische Blickfelder

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Wahl der Größe des Blickfeldes umfasst den "Virtual Space Effekt". Dieser beschreibt die Interaktion zwischen dem realen visuellen Winkel des Betrachters und dem auf dem Display dargestellten GFOV. Objekte einer teleskopischen Darstellung unterliegen in einer Perspektive einer sogenannten Magnification (Vergrößerung), Objekte einer weitwinkligen Darstellung einer Minification (Verkleinerung) [110]. Neben dieser skalierungsbedingten Änderung der Objektgröße kommt es zu Verzerrungen in der Darstellung, die das räumliche Verständnis beeinflussen können. Aufgrund geometrischer Gesetzmäßigkeiten werden bei perspektivischen Abbildungen, die auf planaren Projektionen basieren, die Verzerrungen mit Zunahme des GFOV zum Bildschirmrand zusätzlich verstärkt.

Die Auswirkungen solcher Verzerrungen auf die menschliche Objekterkennungsleistung untersuchte Steinicke [111]. Er fand heraus, dass insbesondere bei großen GFOVs der subjektiv beurteilte Realitätsgrad der Objektdarstellung abnimmt. Sofern sich das GFOV vom realen visuellen Winkel jedoch nicht mehr als 60° unterscheidet, wurden von den Probanden nur geringe Verzerrungen wahrgenommen.

Psotka [112] und McGreevy [110] analysierten den Einfluss des dargestellten GFOV auf die Einschätzung relativer Objektpositionen. Psotka [112] konzentrierte sich im Rahmen einer Selbstlokalisierungsaufgabe auf egozentrische Entfernungen. Er stellte dabei die besten Probandenleistungen bei wahrheitsgetreuen Blickfeldern fest. Bei teleskopischen Darstellungen wurden Entfernungen hingegen unterschätzt, bei weitwinkligen überschätzt. Der Fokus von McGreevys [110] Untersuchung lag auf der Beurteilung exozentrischer Relativpositionen, im Speziellen von exozentrischen Azimut- und Elevationswinkeln. Bei einem Vergleich der Blickfelder von 30°, 60°, 90° und 120° ermittelte er die beste Leistung bei 60°.

Andere Untersuchungen hatten die erzielbare Genauigkeit beim manuellen Fliegen entlang einer Solltrajektorie mit Hilfe perspektivischer Flugführungsdisplays im Fokus. In einer Studie von Alexander [66] bestand die Aufgabe der Testpersonen in der Durchführung kurvenreicher Anflüge mit Unterstützung einer „Tunnel in the Sky“ Anzeige. Dabei wurde die Displayskalierung variiert. Dies geschah durch Variation des realen Blickfeldes mit zwei verschiedenen großen Displays und durch Darstellung zwei verschiedenen großer geometrischer Blickfelder (GFOV). Sowohl die Leistung der Flugführungsaufgabe als auch das Terrain Awareness waren bei einer hohen Displayskalierung, also einer Kombination von kleinem Display mit großem GFOV, am höchsten. Als Ursache nannte er in beiden Fällen den reduzierten Keyhole Effect bei großem Blickfeld. Entgegen der ursprünglichen Erwartung wirkt sich der Keyhole Effect auch negativ auf die Flugführungsaufgabe aus und kompensiert die positive Eigenschaft niedriger Displayskalierungen Trajektorienablagen hoch aufzulösen [66].

In einer anderen Untersuchung kam Sindlinger [113] zu einer ähnlichen Einschätzung. Er empfiehlt ebenfalls ein eher großes Blickfeld im Bereich von 75-80°. Für militärische Tiefflüge und Kunstflüge seien sogar deutlich größere Blickfelder vorstellbar.

Auch Parrish [114] untersuchte die Leistung der Zielführungsaufgabe unter Zuhilfenahme perspektivischer Displays mit verschiedenen GFOVs. Er variierte das laterale GFOV zwischen 40° und 70°. Die Auflösung hielt er dabei durch Verwendung verschieden großer Displays konstant. Die Aufgabe der Probanden bestand in der Durchführung eines MLS-Anfluges¹⁰. Parrish [114] ermittelte dabei zwar keine objektiven Leistungsunterschiede, dennoch konnte er eine subjektive Präferenz für das größere Blickfeld feststellen.

Es lässt sich schlussfolgern, dass für Aufgaben, die ein Objektverständnis oder die Einschätzung relativer Objektposition voraussetzen, kleine oder wahrheitsgetreue Blickfelder zu verwenden sind. Wird jedoch eine umfassendere Orientierung im Raum erfordert, wie beispielsweise für kurvenreiche Anflüge, navigatorische Aufgaben oder für die Generierung von Bewusstsein über den Geländeverlauf, so sind größere Blickfelder, die nicht zwingend wahrheitsgetreu sein müssen, zu bevorzugen.

2.5.5. Gestaltung von Tiefenschlüsseln

Um den Eindruck von Tiefe in einer perspektivischen Abbildung zu unterstützen, können grafische Tiefenschlüssel (Kap. 2.4.3) in diese integriert werden. Sie geben Auskunft über Positionierung und Ausrichtung von Objekten im dreidimensionalen Raum.

Tiefenschlüssel können dabei einen starken oder schwachen Einfluss auf die Wahrnehmung der dritten Dimension besitzen [103]. Bewegungsparallaxe und Verdeckung sind beispielsweise Tiefenschlüssel mit einem sehr starken Einfluss, wohingegen die relative Größe einen eher geringen Einfluss besitzt. Sind mehrere Tiefenschlüssel verfügbar, versucht unser visuelles System, sie zu kombinieren [115]. In der Regel wirken sie sich additiv oder zumindest ergänzend aus [103]. Es ist daher durchaus sinnvoll, mehrere Schlüssel in einer Abbildung zu integrieren.

Neben diesen natürlichen Tiefenschlüsseln, die Phänomene der menschlichen visuellen Informationsaufnahme beschreiben, kann die Ansicht durch synthetische Komponenten, wie der in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Lotliniendarstellung, erweitert werden. Sinnvoll ist dies vor allem dann, wenn als Tiefeninformationen relative Objektpositionen von Interesse sind. Die besondere Eignung dieser

¹⁰ MLS (Microwave Landing System): auf elektromagnetischen Wellen im Gigahertzbereich basierende Landehilfe für Flugzeuge

Darstellung als Tiefenschlüssel wurde in vielen Studien bestätigt [116], [117], [118]. Vor allem durch die Integration von Skalen oder Gitternetzen kann dabei eine hohe Präzision bei der Positionserfassung garantiert werden (Abb. 2-17). Als nachteilig zu erwähnen ist jedoch die Gefahr von Display Clutter. Display Clutter tritt dann auf, wenn zu viele grafische Elemente innerhalb eines begrenzten Bildbereichs abgebildet werden.

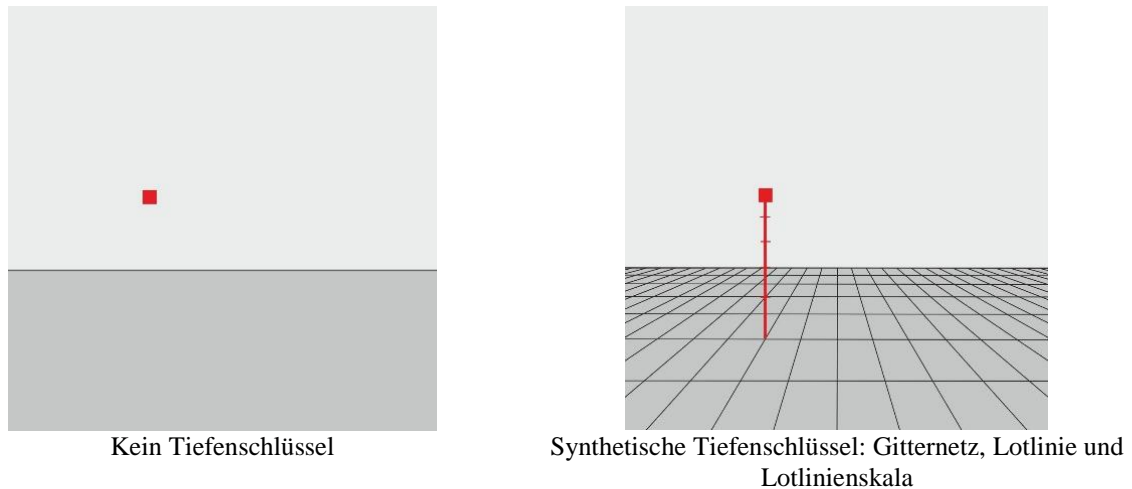


Abb. 2-17: Synthetische Tiefenschlüssel

2.5.6. Gestaltung von Objektsymbolen

Als zentrale Frage der Objektgestaltung in perspektivischen Darstellungen verglich Smallmann [119], [120], [121] in mehreren Studien die Wahrnehmung realistischer Icons mit der Wahrnehmung einfacher zweidimensionaler Symbole. Seine Ergebnisse deuten darauf hin, dass realistische Icons besser geeignet sind, um Kursinformationen von Objekten zu vermitteln [119]. Im Gegensatz dazu stellte er eine bessere Eignung von einfachen Symbolen bei Aufgaben heraus, bei denen Objekte benannt oder identifiziert werden müssen. Aufgrund ihrer eindeutigen Darstellung und der daraus resultierenden besseren Unterscheidbarkeit sind einfache zweidimensionale Objekte für diese Aufgabe besser geeignet [120]. Um die Vorteile beider Darstellungsarten zu kombinieren, unternahm er den Versuch der Entwicklung einer hybriden Gestaltung, den sogenannten Symbicons [121]. Die Ergebnisse eines finalen Vergleichs aller drei Varianten waren jedoch enttäuschend, so dass er letztlich die Verwendung einfacher, zweidimensionaler Symbole empfiehlt. Gestützt werden die Ergebnisse durch eine Untersuchung von Andersson [122]. Andersson vergleicht verschiedene dreidimensionale Objektformen und stellt fest, dass einfache Symbole, wie die Kugel, leichter identifiziert werden können als komplexere Formen, deren Erscheinungsbild auf dem Display sich mit ihrer Ausrichtung ändert. Zur Vermittlung von Richtungsinformationen empfiehlt er daher die Kombination eines einfachen Symbols mit einem Geschwindigkeitsvektor.

2.6. Beschreibung des Anwendungsfalls

Ein grober Überblick über die Aufgaben, die während eines Fluges vom Cockpitpersonal zu bewältigen sind, wurde bereits in Kapitel 2.1 gegeben. Laut Schuttle [123] lassen diese sich in der zivilen Luftfahrt in vier Aufgabenkategorien unterteilen: Aviate, Navigate, Communicate und Manage Systems. Da die von Schuttle vorgenommene Kategorisierung nicht das vollständige Aufgabenspektrum eines Militärflugzeugführers abdeckt, erweiterte Kellerer [124] sie um eine fünfte Komponente, die er als Manage Tactics bezeichnet. Eine eindeutige Priorisierung aller Aufgaben gestaltet sich laut Kellerer schwierig. Besonders für die eng verwobenen Aufgabenkategorien Aviate, Navigate und Manage Tactics kann die Priorisierung entsprechend der Flugphase, des gewählten Automatisierungsgrades, der Mission und der spezifischen Situation variieren.

Die folgende Rangfolge der einzelnen Aufgabenkategorien [125] stellt somit nur einen möglichen Priorisierungsvorschlag dar:

- Aviate
- Navigate
- Manage Tactics
- Communicate
- Manage Systems

Diese fünf Aufgabenkategorien dienen als Grundlage, um Informationselemente zu ermitteln, die Voraussetzung für die Generierung von Situationsbewusstsein sind. Als methodischer Ansatz wird dazu die Hierarchische Task Analyse (HTA) [126] gewählt. Da die Generierung von Situationsbewusstsein nur wahrnehmende und kognitiv verarbeitende Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung erfordert (vgl. Abb. 2-8), werden motorische oder verbale Komponenten der Reaktionsebene im Gegensatz zum üblichen methodischen Vorgehen bei einer HTA nicht berücksichtigt.

Um eine ausreichende Repräsentativität sicherzustellen, erfolgt der Analyseprozess in enger Zusammenarbeit mit aktiven und ehemaligen Airbus Defence and Space Flugpersonal. Jeder der unterstützenden Experten wird instruiert, bei der Analyse sowohl den zivilen als auch den militärischen Kontext zur berücksichtigen.

Das Vorgehen des Analyseprozesses der HTA orientiert sich an dem in ausgewiesener Fachliteratur [126] empfohlenen Vorgehen. Die einzelnen Schritte sind im Folgenden aufgelistet:

- Define task under analysis
- Data collection process
- Determine the overall goal of the task
- Determine task sub-goals
- Sub-goal decomposition
- Plan Analysis

Unter dem Begriff Task werden die oben gelisteten Aufgabenkategorien verstanden. Der Fokus der Analyse liegt auf den Tasks Aviate, Navigate und Manage Tactics, da nur diese einen räumlichen Bezug besitzen. Subgoals beschreiben verallgemeinerte Tätigkeiten, die Schwerpunkt der jeweiligen Aufgabenkategorie sein können. Im Rahmen der "Sub-Goal Decomposition" erfolgt eine weitere Unterteilung der Tätigkeiten, bis letztlich in der finalen Ebene relevante Informationselemente aufgeführt werden. Die Reihenfolge einzelner Tätigkeiten impliziert dabei keine Priorisierung. Eine grafische Visualisierung der Ergebnisse ist in Form eines HTA-Plans im Anhang F – Hierarchische Task Analyse dargestellt. Dieser bildet nur einen Ausschnitt des möglichen Missionsspektrums ab und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Bei Betrachtung des HTA-Plans wird deutlich, dass neben der Aufgabenkategorie Aviate, also der primären Flugführungsaufgabe, entweder die Aufgabe Navigate oder die Aufgabe Manage Tactics parallel zu bewältigen ist.

Die Informationselemente der Aufgabenkategorie Aviate umfassen dabei ausschließlich Raumzustandsgrößen des eigenen Flugzeuges. Entsprechend der Kategorisierung von Endsley (Kap. 2.4.4) wird das Bewusstsein über die benötigten Inhalte dieser Informationsgruppe auch als **räumlich-zeitliches Situationsbewusstsein** bezeichnet. Hierfür wird im Folgenden der Terminus des **einfachen Raumbewusstseins** verwendet.

Zur Durchführung der Aufgabenkategorien Navigate und Manage Tactics werden hingegen weitere Informationselemente benötigt, welche die Raumzustandsgrößen von externen Objekten umfassen. Das Bewusstsein über deren Inhalte wird im Folgenden unter dem Terminus **erweitertes Raumbewusstsein** zusammengefasst. Erweitertes Raumbewusstsein beinhaltet somit die räumlich-zeitlichen Aspekte von geografischen, von Umwelt- und von taktischem Situationsbewusstsein (Kap. 2.4.4).

Wie den Ergebnissen der HTA (Anhang F – Hierarchische Task Analyse) zu entnehmen ist, lassen sich die räumlich-zeitlichen Informationselemente der Aufgabenkategorien Navigate und Manage Tactics durch **Objektrelationen** generalisieren. Objektrelationen beschreiben sowohl relative Positionen als auch relative Geschwindigkeiten zwischen zwei Objekten. Relative Geschwindigkeiten sind deshalb von Bedeutung, da erst durch deren Kenntnis zukünftige Objektrelativpositionen antizipiert werden können.

Objektrelationen können sich auf Punkte, die beispielsweise Flugzeuge oder Wegpunkte repräsentieren, auf Flächen, wie das Terrain oder auf Volumina, wie zum Beispiel Lufträume, beziehen. Sie besitzen dabei entweder eine egozentrische oder eine exozentrische Referenz.

Egozentrische Relationen beschreiben relative Positionen und Geschwindigkeiten externer Elemente gegenüber der Punktkoordinate des eigenen Flugzeuges oder gegenüber einem egozentrischen Luftraum, in dessen Referenzpunkt das eigene Flugzeug positioniert ist.

Exozentrischen Relationen fassen hingegen relative Positionen und Geschwindigkeiten externer Objekte untereinander zusammen. Diese verhalten sich komplett unabhängig von der Position und der Geschwindigkeit des eigenen Fluggerätes.

In Abb. 2-18 wird der Unterschied zwischen egozentrischen und exozentrischen Objektrelationen grafisch visualisiert.

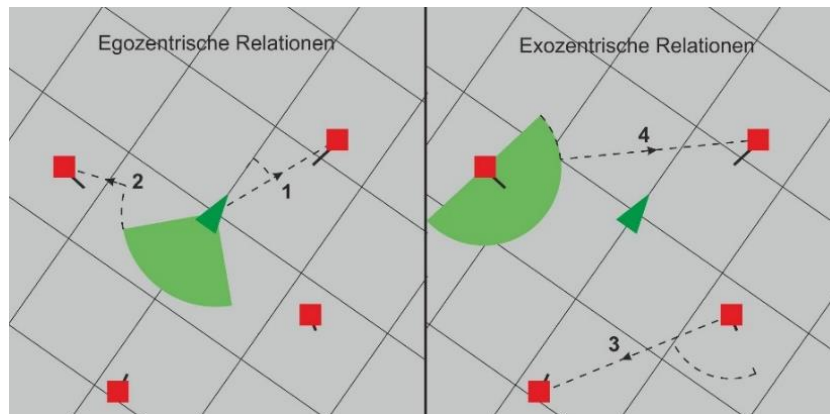


Abb. 2-18: Beispiele für egozentrische und exozentrische Relationen: 1.) Externes Objekt – Eigenes Objekt, 2.) Externes Objekt – Egozentrischer Luftraum, 3.) Externes Objekt – Externes Objekt, 4.) Externes Objekt – Exozentrischer Luftraum

Es wird deutlich, dass im operativen Flugbetrieb verschiedenartige räumliche Informationen vom Piloten aufgenommen und verarbeitet werden müssen. Diese lassen sich durch drei verschiedene Informationsgruppen kategorisieren. Der Zusammenhang zwischen diesen Informationsgruppen und der zugehörigen Aufgaben- und Raumbewusstseinskategorie ist in Tab. 2-2 gegeben.

Tab. 2-2: Informationsgruppen zur Generierung von Raumbewusstsein

Informationsgruppe	Aufgabenkategorie	Raumbewusstsein
Flugzustandsgrößen eigenes Flugzeug	Aviate	Einfach
Egozentrische Objektrelationen	Navigate/Manage Tactics	Erweitert
Exozentrische Objektrelationen	Navigate/Manage Tactics	Erweitert

Während zur Generierung von einfachem Raumbewusstsein flugdynamische Attribute des eigenen Flugzeuges ausreichend sind, bedarf erweitertes Raumbewusstsein die Kenntnis egozentrischer und exozentrischer Objektrelationen. Da die Aufgabenkategorien Aviate und Navigate, beziehungsweise Aviate und Manage Tactics stets parallel zu bearbeiten sind, sollte ein leistungsförderndes Raumformat dem Piloten sowohl bei der Generierung von **einfachem** als auch bei der Generierung von **erweitertem Raumbewusstsein** unterstützen.

2.7. Eignung und Defizite konventioneller Displayformate

In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um den Piloten bei seinen operativen Aufgaben bestmöglich zu unterstützen. Im Wesentlichen haben sich heute drei räumliche Displayformate etabliert: das zweidimensionale, koplanare Format, die egozentrische Perspektive und das exozentrische Format. Unter exozentrischem Format werden dabei sowohl perspektivische als auch axonometrische Abbildungen zusammengefasst. All diese Formate besitzen spezifische Vor- und Nachteile, die bereits in Kapitel 2.5 erläutert wurden. Im Folgenden wird die Eignung dieser drei Displayformate vor dem Hintergrund der Unterstützung von einfachem und erweitertem Raumbewusstsein geklärt. Als Grundlage dienen dazu Display-Designprinzipien, die von Endsley [8] verfasst wurden. Aus ihren Untersuchungen folgernd muss ein Display dabei:

- die Generierung von Situationsbewusstsein auf der Verständnis- und Projektionsebene fördern, anstatt reine Rohdaten bereitzustellen, die der Operateur selbst integrieren und interpretieren muss
- zielorientierte Informationen in der Form bereitstellen, dass Entscheidungen bezüglich eines Ziels direkt getroffen werden können
- die Generierung von globalen Situationsbewusstsein ermöglichen, so dass der Operateur zu jedem Zeitpunkt den kompletten Überblick besitzt und somit eine effiziente und zeitgerechte Priorisierung verschiedener Ziele vornehmen kann

Bezüglich des ersten Punktes weist das koplanare Format Defizite auf. Sollen mit diesem Format Raumkoordinaten vollständig erfasst werden, sind dazu mindestens zwei Ansichten zu betrachten. Die beim Ablesen erzielbare Genauigkeit ist zwar sehr hoch, jedoch führen mehrere Ansichten zu einem erhöhten visuellen Such- und mentalen Integrationsaufwand bei der Generierung von erweitertem Raumbewusstsein. Aufgrund der erhöhten räumlichen Distanz zusammengehörender Informationsträger entspricht diese Darstellungsart auch nicht dem Proximity Compatibility Principle [39]. Die Generierung von einfachem Raumbewusstsein hinsichtlich der Lagewinkel (Nick-, Kurs- und Rollwinkel) erfordert sogar eine dritte Anzeige in Gestalt eines Fluglagedisplays.

Egozentrische Perspektiven stellen die Umgebung im Gegensatz zu koplanaren Formaten zwar in einer integrierten Form dar, allerdings ist die Ausschnittgröße begrenzt. Durch den Keyhole-Effekt kann erweitertes Raumbewusstsein nicht, wie in Punkt drei gefordert, global, sondern nur für einen lokalen Bereich erzeugt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom sogenannten Flight Path Awareness [71]. Innerhalb des durch die egozentrische Perspektive abgebildeten Bereiches kann erweitertes Raumbewusstsein aufgrund der integrierten Darstellungsart und der hohen Auflösung jedoch sehr gut vermittelt werden. Dabei wird vor allem die Einschätzung egozentrischer Objektrelationen unterstützt. Des Weiteren ist es möglich, in die Ansicht Indikatoren zur Generierung von einfachem Raumbewusstsein zu integrieren, beziehungsweise durch Rotation und Verschieben des Bildausschnittes Fluglagewinkel abzubilden. Daher eignet sich diese Darstellungsart sehr gut zur Vermittlung von Flugzustandsgrößen des eigenen Flugzeugs.

Um dem störenden Keyhole-Effekt zu begegnen, gab es Überlegungen die Abbildung mit einer sogenannten "Panning Funktion" [45] auszustatten. Durch sie sollte die Richtung des sichtbaren Ausschnittes anpassbar sein. Änderungen außerhalb des gewählten Blickfeldes können auf diese Art jedoch ebenfalls nicht detektiert werden. Dazu wären zusätzliche Indikatoren nötig, welche die Komplexität der Anzeige erhöhen würden. Die Generierung von erweitertem Raumbewusstsein auf globaler Ebene wird durch diese Anzeige daher nicht unterstützt.

Anders verhält es sich bei exozentrischen Darstellungen. Durch eine passende Positionierung der virtuellen Kamera kann der gesamte, das eigene Flugzeug umgebende Raum in integrierter Form abgebildet werden. Da sowohl egozentrische als auch exozentrische Objektrelationen in integrierter Form dargestellt werden, wird die Generierung von erweitertem Raumbewusstsein auf globaler Ebene unterstützt. Im Vergleich zur egozentrischen Perspektive ist das dargestellte Raumsegment jedoch geringer aufgelöst. Zudem unterliegt die Erfassung egozentrischer Relativpositionen im Gegensatz zu egozentrischen Perspektiven der doppelten Vieldeutigkeit, da auch die Lage der eigenen Position innerhalb der Ansicht ermittelt werden muss. Vor allem besitzen exozentrische Darstellungen jedoch in

Bezug auf die Generierung von einfachem Raumbewusstsein Defizite. Zum einen werden Fluglagewinkel mit einer sehr geringen Auflösung abgebildet. Zum anderen erfordert das Erfassen von Fluglagewinkeln je nach Positionierung und Ausrichtung der virtuellen Kamera verschieden starke mentale Rotationen und Translationen des Operators. Dies führt zu Genauigkeitseinbußen, weshalb Punkt eins und zwei von Endsley's Designvorgaben nur eingeschränkt erfüllt werden.

Ein anderes Darstellungskonzept besteht in der Kombination verschiedener Formate durch einen sogenannten Split Screen. Das Ziel dieses Ansatzes ist es die Vorteile verschiedener Ansichten zu kombinieren. Beim Ablesen von diesem Display müssen allerdings, ähnlich dem zweidimensionalen, koplanaren Format, Informationen verschiedener Ansichten mental fusioniert werden, was wiederum der ersten Designvorgabe widerspricht.

Erfolgt beim Split Screen die Kombination einer beliebigen Anzeige mit einer egozentrischen Perspektive, ist entsprechend Olmos [90] zudem mit einem „Tunneling“ der Aufmerksamkeit zu Gunsten der egozentrischen Darstellung zu rechnen. Er stellte fest, dass Versuchspersonen mit einer Split-Screen Darstellung im Vergleich zu anderen Formaten mehr Zeit benötigen, um plötzlich erscheinende Objekte zu detektieren, die sich außerhalb des egozentrischen Blickfeldes befinden.

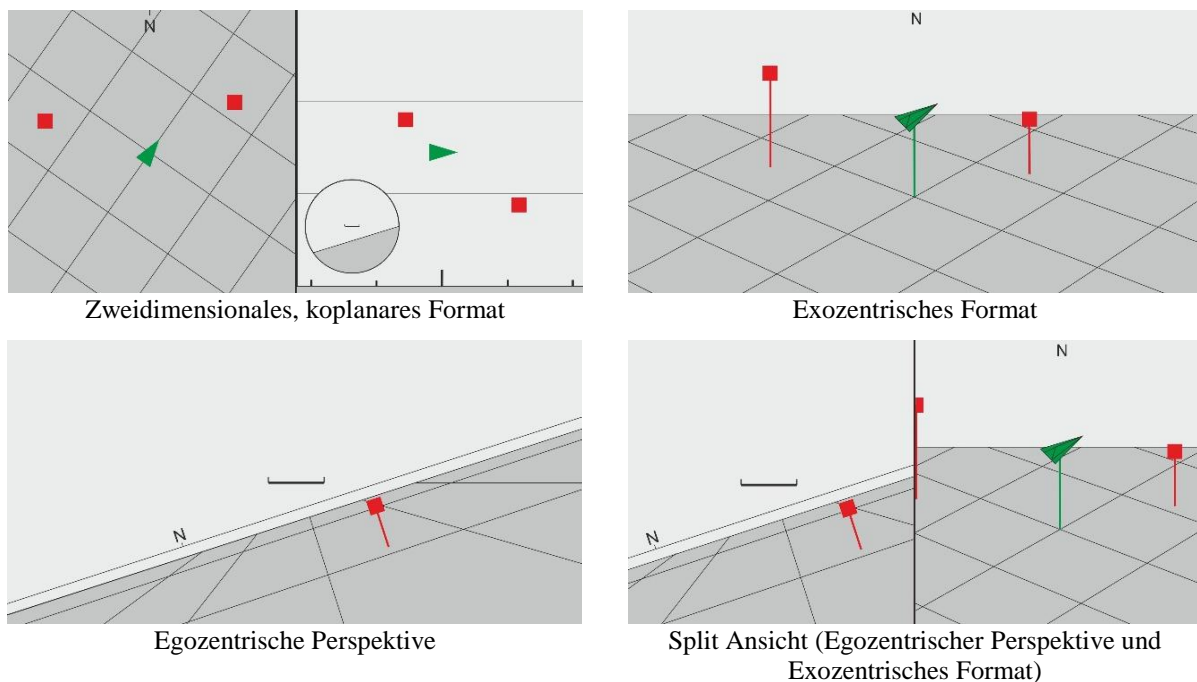


Abb. 2-19: Konventionelle Raumformate

Es wird deutlich, dass alle drei etablierten Raumformate und auch die Split Screen Ansicht bezüglich der Einhaltung der Endsley'schen Designrichtlinien letztlich nur einen Kompromiss beschreiben. Tab. 2-3 fasst die Defizite aller beschriebenen Darstellungsarten in einer Übersicht zusammen.

Tab. 2-3: Defizite konventioneller Displaykonfigurationen

Zweidimensionales, koplanares Format	Exozentrisches Format	Egozentrische Perspektive	Split Ansicht
<ul style="list-style-type: none"> – Hoher visueller Such- und mentaler Integrationsaufwand bei der Fusion zweier Ansichten – Keine Integration von Parametern der primären Flugführungsaufgabe möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – Doppelte Vieldeutigkeit – Schlechte Auflösung/notwendige mentale Transformation der Fluglagewinkel des eigenen Fluggerätes 	<ul style="list-style-type: none"> – „Keyhole Effekt“ durch beschränktes Blickfeld 	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher visueller Such und mentaler Integrationsaufwand bei der Fusion zweier Ansichten – Tunneling der Aufmerksamkeit auf egozentrische Darstellung

Auf der Suche nach einer optimierten Darstellung soll im Rahmen dieser Arbeit daher ein neuer Weg beschritten werden. Um alle oben gelisteten Designvorgaben zu erfüllen, sieht der verfolgte Realisierungsansatz dabei die Vergrößerung des horizontalen Blickfeldes der egozentrischen Perspektive hin zu einer **Panoramadarstellung** vor. Eine Darstellung auf einem **Großflächendisplay** wird dabei als zwingende Voraussetzung betrachtet, um die Lesbarkeit der Displayinhalte trotz deutlich erhöhter Informationsmenge sicherzustellen.

2.8. Panoramen

Panoramaartige Darstellungen finden bevorzugt in der Fotografie und der Kunst Anwendung [127]. Durch ihre Weitwinkligkeit soll ein vollständiges Bild der Umgebung in allen Raum- beziehungsweise Himmelsrichtungen vermittelt werden. Im 18. Jahrhundert hat Robert Barker seine Gemälde erstmalig auf einer zylinderförmigen Wand präsentiert, um eine Rundumsicht zu erzeugen [128]. Er ist auch verantwortlich für die Namensgebung dieser Darstellungsform. Panoramen üben seitdem einen großen Reiz auf den Betrachter aus. Mit der Erfindung der Fotografie im Jahr 1839 wurde diese Entwicklung weiter verstärkt. Während zunächst mit Hilfe von Panoramakameras 360°-Raumansichten entstanden, stellt im gegenwärtigen digitalen Zeitalter das Zusammenfügen einzelner Fotografien (engl. „photo stitching“) dazu eine einfache Alternative dar [127].

Heute werden Panoramen unter anderem auch im Bereich der virtuellen Bildgenerierung zur Visualisierung von Räumen und Körpern genutzt. Ein Beispiel dafür ist die 3D-Cave des Human Factors Engineering Labors von Airbus Defence and Space. Mit dieser Visualisierungsumgebung ist es möglich, aktuelle Entwicklungsstände von Bauteilen oder ganzen Cockpits in realer Größe dreidimensional abzubilden, bevor diese physikalisch existieren. Dabei lassen sich horizontale Blickfelder von weit über 270° realisieren. Geometrische und reale Blickwinkel sind identisch.

Ein anderes Beispiel, bei dem sich geometrische und reale Blickwinkel jedoch unterscheiden, ist im Bereich der Cockpitanwendungen zu finden. Das sogenannte Airborne Three-Dimensional Separation Assistance Display ist ein Assistenzdisplay, das den Piloten unterstützen soll, Staffelungsgrenzen nicht zu unterschreiten, um somit Mid-Air-Kollisionen zu vermeiden [129]. Es basiert auf einer sphärischen Projektion, bei der Raumelevationswinkel von -90° bis +90° über Raumazimutwinkel von -180° bis 180° aufgetragen sind. Um eine aktive Unterstützung bei der Einhaltung von Staffelungsgrenzen zu gewähren, werden Winkelsegmente auf dem Display markiert, in die der Flugpfadvektor nicht bewegt werden darf. Aufgrund des Fehlens der Objektlotte und einer Referenzebene können Entfernungsinformationen nur unzureichend über die relative Objektgröße vermittelt werden. Dieses Assistenzdisplay beschreibt daher keine Perspektive im klassischen Sinne.

Im Gegensatz dazu soll das neuartige Panoramaformat kein Assistenzdisplays sein, sondern Raumbewusstsein hinsichtlich der in Kapitel 2.6 beschriebenen Informationskategorien generieren. Aufgrund der Novität dieses Anwendungskontextes existieren derzeit jedoch keine wissenschaftlichen Studien, die eine mögliche Eignung im Cockpit eines Flugzeuges belegen. Um diesen Nachweis in Form einer vergleichenden Untersuchung zu führen, werden im folgenden Kapitel die Entwicklung eines möglichen Konzeptes der Panoramadarstellung beschrieben und deren Eigenschaften erläutert.

3. Konzeption eines großflächigen Panoramaformats

Betrachtet man die historische Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Flugzeugcockpits, so erkennt man eine stetige Zunahme der dargestellten Gesamtinformationsmenge. Als Ursache dafür ist die fortwährende Zunahme der Komplexität und Funktionalitäten von Flugzeugsystemen zu nennen [15]. Des Weiteren wurden dem Piloten in der Vergangenheit immer mehr Aufgaben übertragen. So besitzt er heute Verantwortungen in Tätigkeitsfeldern, die früher von Bordingenieuren oder Navigatoren abgedeckt wurden. Trotz Zunahme der dargestellten Informationsmenge verringerte sich in den letzten 40 Jahren gleichzeitig die Anzahl der Displayelemente [130]. Verwirklicht wurde dies durch die Verwendung von Multifunktionsdisplays (Kap. 2.2.1), mit denen verschiedene Informationsklassen selektiv über ein und dasselbe Displayelement dargeboten werden können. Die Gestaltungsmöglichkeiten einzelner Displayinhalte werden in Cockpits aktueller Flugzeuggenerationen vor allem durch die zur Verfügung stehende Displayfläche beschränkt. Möchte man dabei dem steigenden Informationsangebot gerecht werden, führt dies entweder zu einer unüberschaubaren Anzahl an selektiv zu wählenden Displayformaten oder zu überfrachteten Formatinhalten. Da eine Informationsaufnahme auf diese Art negativ beeinträchtigt würde [131], ist sicherzustellen, dass Anzeigeelemente nicht zu klein sind. Es wird daher empfohlen, kleine Multifunktionsdisplays durch ein einzelnes Großflächendisplay zu ersetzen (Kap. 2.2.2). Die Integration dieser neuartigen Displaytechnologie wird als logischer evolutionärer Schritt der Cockpitentwicklung betrachtet, der, mit Ausnahme der F-35, (Joint Strike Fighter Lightning II von Lockheed Martin [132]) bei allen Flugzeugmustern noch aussteht.

Durch die Vergrößerung der Displayfläche mit einem Großflächendisplay ergeben sich neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle hinsichtlich der Steigerung von Raumbewusstsein. Ein Ansatz zur Nutzung dieser Möglichkeiten stellt die perspektivische Panoramaansicht dar, welche die Vorteile verschiedener Raumformate (siehe Kap. 2.7) in einer einzigen Darstellung als Teil eines Synthetic Visions Systems (Kap. 2.2.3) vereinen soll. Das perspektivische Panoramaformat erfordert die Abbildung auf einem Großflächendisplay, da dieses im Vergleich zu konventionellen Displays eine deutlich verbesserte Lesbarkeit gewährleistet. Eine Anwendung auf einem kleineren Display würde aufgrund der Vielzahl abzubildender, grafischer Elemente zu einer unübersichtlichen und schwer lesbaren Darstellung führen.

In diesem Kapitel wird ein geometrisches Integrationskonzept eines Großflächendisplays sowie ein Anzeige- und Bedienkonzept zur Interaktion mit diesem vorgestellt. Danach wird auf Designaspekte des neuartigen Raumformats eingegangen und ein möglicher Designentwurf präsentiert. Abschließend werden Besonderheiten der Panoramaansicht untersucht und auf den gewonnenen Erkenntnissen basierend, Hypothesen abgeleitet, die sich auf die Eignung eines solchen Raumformates im Flugzeugcockpit beziehen.

3.1. Integration des Großflächendisplays in ein Flugzeugcockpit

Die Idee, Großflächendisplays in Flugzeuge zu integrieren, ist nicht neu. Bereits Mitte der 80er Jahre wurde die Verwendung solcher Displays in hochagilen Flugzeugen von Adam et al. [5] in Betracht gezogen. Einzig die technischen Möglichkeiten zur Realisierung fehlten zur damaligen Zeit.

Heute arbeiten inzwischen zahlreiche namhafte Hersteller, wie Airbus Defence and Space, Lockheed Martin [133], Garmin [134] oder Boeing [132] an Lösungen zur Integration großflächiger Displays in ein Flugzeugcockpit. Die Anstrengungen der Entwicklungen beschränken sich dabei nicht mehr allein auf militärische Anwendungen. So ist davon auszugehen, dass in mittelfristiger Zukunft zahlreiche Flugzeuggattungen mit Großflächendisplays ausgestattet werden.

Die dabei verfolgten Integrationskonzepte unterscheiden sich hinsichtlich der Anzeige- und Bedienelemente, die durch das Großflächendisplay abgebildet werden. Sowohl Displaygröße als auch Displayform sind daher maßgeblich vom Integrationskonzept abhängig.

Während die ersten Konzepte noch ausschließlich die Verwendung von rechteckigen, planaren und eher kleinen Displays vorsahen, ist es heute sogar möglich, die Displayfläche durch eine nicht-rechteckige und nicht-planare Displaygeometrie zu maximieren.

Ein Beispiel einer komplexen Displaygeometrie eines Ein-Manncockpits wird durch das Panoramic Cockpit Control and Display System (PCCADS) beschrieben [135]. Die in diesem Projekt geplante Cockpitkonfiguration sieht neben einem zentralen Großflächendisplay, einem HUD und einem HMD auch die Integration gekrümmter Displays für die peripheren Elemente des Hauptinstrumentenbretts vor. Gardner [136] beschreibt hingegen eine mögliche Konfiguration eines Zwei-Mann-Cockpits, bei dem neben dem Hauptinstrument auch das Pedestal in die Displaysuite einbezogen wird. Dabei wird der Übergang zwischen beiden Cockpit-elementen durch ein einziges gekrümmtes Display realisiert.

Bei der Umsetzung solcher Vorhaben ist auch darauf zu achten, dass die Displayhardware grundlegenden luftfahrtspezifischen Anforderungen gerecht wird. Neben der Robustheit gegenüber Vibrationen und anderen Umgebungseinflüssen, sind in diesem Zusammenhang auch besondere Vorgaben bezüglich Helligkeit, Kontrast, Flimmern und Displayreflexionen zu nennen. Diesbezügliche Detailinformationen sind in dem Standard MIL-STD 1472G [57] unter Punkt 5.2 Visual Displays nachzulesen.

3.1.1. Auswahl des Flugzeugmusters

Die Wahl eines repräsentativen Flugzeugmusters, an dem sich die Konzeption des Panoramaformats orientieren soll, fällt auf den Eurofighter Typhoon. Begründen lässt sich die Wahl vor allem mit der guten Verfügbarkeit von flugzeugspezifischer Expertise und Hardware am Airbus Defence & Space Standort Manching. Ferner stellt die Operation eines hochagilen Flugzeuges an den Piloten besonders hohe Anforderungen hinsichtlich kognitiver Belastungen. Dies gilt vor allem für Flugzeuge mit einem Ein-Mann Cockpit, bei welchem einem einzigen Piloten alle cockpitgebundenen Aufgaben zur Missionsdurchführung übertragen werden.

Da die in Kapitel 2.6 ermittelten Informationsgruppen, die durch das neuartige Raumformat darzustellen sind, sowohl im militärischen als auch im zivilen Kontext von besonderer Relevanz sind, lassen sich die in dieser Arbeit generierten Ergebnisse auf beliebige andere Flugzeugmuster übertragen.

3.1.2. Geometrische Rahmenbedingungen

Bei der Integration eines Großflächendisplays in den Eurofighter muss die bestehende Cockpitstruktur als Rahmenbedingung berücksichtigt werden. Eine freie Konfiguration, die eine Neuentwicklung des gesamten Cockpits zur Folge hätte, ist aus monetären und zeitlichen Gründen nicht vorgesehen. Es wird sich daher auf Anzeige- und Bedienelemente des Hauptinstrumentenbrettes beschränkt. Sicherheitskritische Elemente, wie Get You Home (GUH) Instrumente, dürfen nicht entfernt werden. Der Konzeptentwurf beschränkt sich somit auf das Ersetzen der drei MFDs und Teile des Head Up Panels (HUP) durch ein rechteckiges Großflächendisplay. Die Breite des Displays beträgt 640 mm, die Höhe 230 mm. Dies führt zu einer Vergrößerung der Displayfläche von ursprünglich 696 cm² [137] auf 1302 cm². Sie beträgt somit das 1,9-fache (Abb. 3-1, Abb. 3-2). Vorausgesetzt wird bei diesen Betrachtungen ein Displayrand von 10 mm Breite. Verglichen mit dem Joint Strike Fighter von Lockheed Martin, dessen Fläche des Großflächendisplays nur ca. 1000 cm² beträgt [132], steht bei dem Konzept für den Eurofighter eine um den Faktor 1,3 größere Anzeigefläche zur Verfügung.

Von der Verwendung sogenannter Softkeys, die bei der konventionellen Eurofighter Cockpitkonfiguration der Interaktion mit Displayinhalten dienen, wird abgesehen (Abb. 3-2). Softkeys können zwar beliebig konfiguriert werden, durch ihre stete physikalische Präsenz allokieren sie jedoch auch dann eine bestimmte Fläche, wenn sie gar nicht benötigt werden. Die durch Softkeys abzubildenden Funktionalitäten werden stattdessen durch alternative Bedienelemente bereitgestellt (Kap. 3.1.3).



Abb. 3-1: Konventionelle Konfiguration mit 3 MFDs und HUP – Displayfläche 696 cm² [124]



Abb. 3-2: Neue Konfiguration mit Großflächendisplay – Displayfläche 1302 cm²

Analog der Größe und Geometrie des Großflächendisplays orientiert sich auch dessen Ausrichtung und Positionierung an den geometrischen Gegebenheiten der aktuellen Eurofighter Cockpitkonfiguration. Dabei wird das Großflächendisplay, ähnlich der konventionellen Multifunktionsdisplays, oberflächenbündig in das Hauptinstrumentenbrett integriert.

Die Ausrichtung und Positionierung des Hauptinstrumentenbretts richtet sich wiederum nach dem Augpunkt des Piloten. Dazu wird ein Design Eye Point (DEP) definiert. Er dient als Hilfsmittel bei der Cockpitentwicklung, indem er einen von körperlichen Merkmalen unabhängigen Bezugspunkt der Pilotenaugen beschreibt. Dadurch kann die Lesbarkeit und Bedienbarkeit aller Displayinhalte unter verschiedenen Lichtverhältnissen gewährleistet werden [124]. Eine variable Cockpitsitzverstellung ermöglicht zudem, dass die Augpunkte aller Piloten, deren anthropometrischen Maße sich innerhalb des 5. und 95. Perzentsils befinden, mit dem DEP zusammentreffen [137].

Die Neigung des Displays gegenüber der Flugzeughorizontalen beträgt bei einer oberflächenbündigen Integration in das Hauptinstrumentenbrett 77,5° (α , Abb. 3-3). Für eine optimierte Lesbarkeit wäre eigentlich ein senkrechter Blickpfad auf das Displayzentrum erstrebenswert. Aufgrund geometrischer Restriktionen ist dieser jedoch nicht realisierbar.

Die sogenannte „Over the Nose Vision“ stellt die normale Sichtlinie in der Vertikalebene dar [57]. Sie beschreibt auch eine virtuelle Grenze, welche die Displayoberkante nicht überschreiten darf. Die vom DEP aus gerichtete Neigung dieser Linie beträgt 15° gegenüber der Flugzeughorizontalebene (γ), die Neigung der Linie zur Oberkante des Großflächendisplays beträgt 16,7° (β). Die vertikale Ausrichtung des Displays erfolgt annähernd orthogonal zur normalen Sichtlinie. Die Entfernung zwischen DEP und dem Mittelpunkt der Displayoberfläche des mittleren Multifunktionsdisplays der konventionellen Konfiguration beträgt nach Spinoni [137] 740 mm. Für die flugzeughorizontale Entfernung zur oberen Displaykante des Großflächendisplays ergeben sich demnach 633 mm (D).

Für die realen Blickfelder, die durch das Großflächendisplay aufgespannt werden, ergeben sich Werte von maximal 15,6° (VFOV) in der Flugzeugvertikalen und 50,3° in der Flugzeughorizontalen (HFOV). Die vertikale Neigung des zentralen Displaybereichs gegenüber der Flugzeughorizontalen beträgt 34,6° (θ).

3.1.3. Anzeige- und Bedienkonzept

Werden Informationen benötigt, die das Pilot Awareness Format nicht abbildet, kann dieses optional von anderen Formaten überblendet werden. Die Überblendung beschränkt sich dabei auf die seitliche Displayperipherie, die sogenannten Seitenfenster. Durch das Ein- und Ausblenden von Zusatzinformationen über diese Seitenfenster wird sichergestellt, dass der zentrale und wichtige Bereich des Pilot Awareness Formats stets sichtbar bleibt.

Durch das Bedienkonzept werden die Anwahl und Manipulation von Displayinhalten beschrieben. Bereits in Kapitel 3.1.2 wurde erwähnt, dass vor dem Hintergrund einer maximierten Anzeigefläche auf die Verwendung konventioneller physischer Bedienelemente, wie Softkeys, verzichtet wird. Stattdessen werden interaktive Schaltflächen direkt auf dem Display bereitgestellt. Diese werden je nach Bedarf ein- und ausgeblendet. Interaktive Schaltflächen befinden sich entweder am Displayrand, in Form von virtuellen Druckknöpfen, oder werden direkt grafischen Objekten überlagert. Bei der

Anwahl grafischer Objekte wird dann ein Kontextmenü dargestellt, über welches die eigentliche Bedienaktion zu wählen ist.

Die zentrale Frage nach der Wahl des passenden Bediengerätes beantwortete Kellerer [124]: Er verglich die Leistungen von Probanden bei Bildschirmeingaben durch ein indirektes Bediengerät, den Trackball, mit einem direkten Bediengerät, dem Touchscreen. Er stellte fest, dass die Anwahl virtueller Schaltflächen mit einem Touchscreen genauso zuverlässig, jedoch signifikant schneller erfolgt als mit einem Trackball. Die interaktiven Schaltflächen wiesen dabei eine Mindestseitenlänge von 17 mm und einen Mindestabstand von 2 mm auf. In einigen Flugzeugen, wie beispielsweise der F35, findet der Touchscreen bereits Anwendung.

Um nach wie vor dem „Hands on Stick and Throttle“ (HOTAS) Prinzip zu entsprechen, ist die Bedienung redundant ausgelegt. Das HOTAS-Prinzip schreibt vor, dass wichtige Interaktionsschritte durchführbar sein müssen, ohne dabei die Hände von den primären Steuergeräten Steuerknüppel und Schubhebel zu entfernen. Erzeugt wird die Redundanz durch das Festhalten an konventionellen alternativen Eingabegeräten, wie den XY-Controller am Schubhebel und die direkte Spracheingabe.

Die Bedienung über Touchscreen wird zudem über einen haptisch kodierten Rahmen am Displayrand erleichtert [139]. Dieser dient einerseits als Handablagefläche und unterstützt dadurch die Bedienung bei hohen Fliehkräften. Des Weiteren erleichtert die haptische Kodierung die Lokalisierung der Displayposition virtueller Schaltflächen über den taktilen Sinneskanal der Fingerkuppen.

Um den Piloten auch über den Status seiner Bedienaktionen zu unterrichten, wurde ein taktiler Feedbackhandschuh entwickelt [140]. Neben visuellem Feedback durch das Display erhält der Pilot mit Hilfe dieses Handschuhs eine taktile Rückmeldung in Form von Vibrationen auf der Rückseite des bedienenden Fingers.

Eine detaillierte Beschreibung des Anzeige- und Bedienkonzeptes ist in Kellerer [6] nachzulesen.

3.2. Designaspekte des neuartigen Raumformats

Die funktionalen Anforderungen, die an das neuartige Raumformat zu stellen sind, wurden in Kapitel 2.6 aus dem Aufgabenspektrum des Piloten abgeleitet. Dabei wurde gezeigt, dass für die erfolgreiche Erfüllung der durch die HTA beschriebenen Aufgaben Situationsbewusstsein in Form von einfachen und erweiterten Raumbewusstsein erforderlich ist. Die wichtigsten Informationselemente, die zur Generierung beider Formen von Raumbewusstsein erforderlich sind, sind in Tab. 3-1 gelistet.

Tab. 3-1: Informationselemente zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen

Einfaches Raumbewusstsein	Erweitertes Raumbewusstsein
Flugzustandsgrößen des eigenen Flugzeugs: <ul style="list-style-type: none">• Fluggeschwindigkeit• Flughöhe• Kurswinkel• Nickwinkel• Rollwinkel• Horizontale Trajektorienablage• Vertikale Trajektorienablage• Anstellwinkel• Schiebewinkel	Egozentrische/Exozentrische Objektrelationen: <ul style="list-style-type: none">• Relativposition<ul style="list-style-type: none">○ Relative Entfernung○ Relativer Peil-/Azimutwinkel○ Absolute und relative Höhe• Relativgeschwindigkeit<ul style="list-style-type: none">○ Relative Horizontalgeschwindigkeit○ Relativer Kurswinkel○ Relative Vertikalgeschwindigkeit

Die Defizite konventioneller räumlicher Darstellungen hinsichtlich der Erfüllung der funktionalen Anforderungen wurden in Kapitel 2.7 ausführlich erläutert. Die wichtigsten Punkte werden im Folgenden wiederholt aufgeführt:

- Das zweidimensionale, koplanare Format verlangt einen erhöhten visuellen Such- und mentalen Integrationsaufwand bei der Positionsbestimmung dreidimensionaler Objekte und erfordert zur Vermittlung von einfachen Raumbewusstsein bezüglich der eigenen Fluglage eine zusätzliche Anzeige
- Das exozentrische Format bildet eigene Fluglagewinkel sowie vertikale und horizontale Ablagen, die Voraussetzung zur Generierung von einfachen Raumbewusstsein sind, in nur geringer Auflösung ab und erfordert zum Verständnis dieser mentale Rotationen und Translationen
- Die egozentrische Perspektive vermittelt erweitertes Raumbewusstsein aufgrund des „Key-hole-Effektes“ nur für ein beschränktes Raumsegment

Als Grundlage zur Entwicklung eines optimierten Anzeigeformates, das keine der gelisteten Defizite aufweist, wird die egozentrische Perspektivdarstellung verwendet. Diese erfüllt die funktionalen Anforderungen bereits für ein beschränktes Blickfeld. Ein zusätzliches Argument für diese Darstellungsart ist die in Kapitel 2.5.3 beschriebene Eigenschaft, Rauminformationen mit egozentrischem Bezug besonders leicht erfassbar abzubilden. Im Gegensatz zu exozentrischen Darstellungen muss dabei die eigene Position nicht erst abgeleitet werden.

Der Problematik der Beschränkung des Blickfeldes wird durch eine Anpassung des Projektionsalgorithmus begegnet, indem die Abbildung auf eine konvex gekrümmte Projektionsfläche erzeugt wird. Auf diese Weise lassen sich weitwinklige Raumbilder mit beliebigen Blickfeldgrößen realisieren. Wird dabei der komplette umgebende Raum in Form einer 360° Rundumsicht dargestellt, werden die Raumbilder auch als Panorama bezeichnet (Kap. 2.8). Situationsbewusstsein kann somit, wie unter Punkt 3 in Kapitel 2.7 von Endsley gefordert, auch global generiert werden. Das neuartige Darstellungskonzept sieht daher die Verwendung eines **perspektivischen Panoramaformats** vor. Zur Konzeption des neuartigen Formates werden im Folgenden die Auswahl der Projektionsart und des Bezugssystems beschrieben. Anschließend werden die Integration von Tiefenschlüsseln und Subskalen, die grafische Gestaltung sowie die variablen Projektionsparameter erläutert.

3.2.1. Projektionsart

Panoramadarstellungen können mit Hilfe verschiedener Projektionsarten umgesetzt werden (Kap. 2.3.2). Zu nennen sind in diesen Zusammenhang die kubische, die sphärische und die zylindrische Zentralprojektion. Die einzelnen Bezeichnungen leiten sich aus der geometrischen Form des zu Grunde liegenden Projektionskörpers ab.

Während mit der kubischen und der sphärischen Zentralprojektion die Darstellung des vollständigen umgebenden Raumes in allen Dimensionen möglich ist, sind mit der zylindrischen Zentralprojektion lediglich horizontale oder vertikale Panoramen realisierbar. Kubische Projektionen besitzen hingegen den Nachteil, dass die Körperkanten Diskontinuitäten in der Abbildung erzeugen. Da diese schwer interpretierbar sind, scheidet die kubische Projektion für das neuartige Raumformat aus.

Stattdessen wird auf eine Projektionsart zurückgegriffen, die auf einem rotationssymmetrischen Projektionskörper, wie Kugel, Zylinder, Ellipse oder Kegelstumpf, basiert. Aufgrund der Tatsache, dass die beiden letztgenannten Sonderformen der Kugel, beziehungsweise des Zylinders repräsentieren, werden diese ebenfalls nicht weiter berücksichtigt.

Die zur Auswahl stehenden Alternativen werden somit durch die **Kugel** und den **Zylinder** beschrieben. Um unnötige Inhomogenitäten der Abbildung zu vermeiden, sollte das Projektionszentrum sich jeweils auf der vertikalen Rotationsachse befinden, sodass die Schnittkreise konzentrisch zu dieser verlaufen.

Bei der Kugel ist die Projektionsfläche in allen drei Raumdimensionen konzentrisch gekrümmt. Die Abbildungsvorschrift ist somit für die horizontale und vertikale Dimension gleich. Das Abbild der

Kugelprojektion zeichnet sich durch ein orthogonales, geradliniges Winkelgitternetz aus, welches eine konstante Auflösung besitzt und somit aus identischen Rechtecken besteht. Besitzen Horizontal- und Vertikaldimension der Abbildung die gleiche Auflösung, so werden aus den Rechtecken Quadrate (Kap. 2.3.2.2, Abb. 2-4).

Die Oberfläche des Zylinders ist hingegen nur in der Horizontalebene konzentrisch gekrümmt. In der Vertikaldimension verläuft sie geradlinig. Die Abbildungsvorschriften in Horizontal- und Vertikaldimension sind daher verschieden. In der Kartografie entspricht diese Projektionsart der normalen Mercatorprojektion. Auch diese weist ein orthogonales, geradliniges Winkelgitternetz auf. Dessen Auflösung ist zwar in der Horizontal-, jedoch nicht in der Vertikaldimension konstant. Sie verhält sich nichtlinear und nimmt mit abnehmender Entfernung zu den Polen zu (siehe Abb. 2-3). Die Pole selbst können nicht abgebildet werden (Kap. 2.3.2.1, Abb. 2-3).

Um nun eine finale Auswahl zugunsten der sphärischen oder der zylindrischen Zentralprojektion zu treffen, wurde untersucht, wie sich die Abbildungsvorschriften auf perspektivische Darstellungen auswirken [141]. Dazu wurden besondere Eigenschaften der Abbildungen identifiziert und auf kleinen Kärtchen visualisiert. Im Rahmen einer Befragung waren diese Eigenschaften entsprechend ihrer Wichtigkeit in eine Rangfolge zu überführen. Die befragten neun Personen besaßen als aktive oder ehemalige Piloten oder Waffensystemoffiziere alle eine grundlegende fliegerische Expertise. Insgesamt mussten sechs Eigenschaften pro Ansicht bewertet werden. Die Rangfolge umfasste also zwölf Positionen.

Im Ergebnis wurde eine eindeutige Präferenz der Eigenschaften der sphärischen Zentralprojektion festgestellt. Die ausschlaggebenden Eigenschaften waren zum einen die Möglichkeit, auch ein vertikales Blickfeld von 180° abbilden zu können sowie die Konsistenz der Abbildungsvorschriften der horizontalen und vertikalen Dimension. Das Ergebnis wurde durch den zusätzlich erfragten Gesamteindruck der Darstellungsart bestätigt [141]. Dem neuartigen Raumformat wird daher eine sphärische Zentralprojektion zu Grunde gelegt.

3.2.2. Projektionsbezugssystem

In Kapitel 3.2 wurde beschrieben, dass das neuartige Raumformat auf einer **perspektivischen Panoramadarstellung** basieren soll. Die Idee dabei ist es, die Vorteile egozentrischer Perspektiven durch Erweiterung des Blickfeldes auf globaler Ebene zu nutzen. Um dies zu realisieren, wäre daher eigentlich die Verwendung eines rein egozentrischen Bezugssystems am naheliegendsten. Aufgrund einer besonderen Eigenschaft von Panoramen, wird davon jedoch Abstand genommen.

Eine rein egozentrische Panoramadarstellung ist geometrisch zwar realisierbar, die Interpretation der Darstellung würde für die Anwendung im Flugzeug jedoch bei Roll- und Nickwinkeln ungleich Null erhebliche Probleme verursachen. Fliegt man beispielsweise im Steigflug mit einem Nickwinkel von 40°, sieht man beim Blick nach vorne primär den Himmel, beim Blick nach hinten primär den Boden. Die Horizontlinie besitzt einmal einen niedrigen und einmal einen hohen Elevationswinkel. Die Kurve zwischen beiden Extremwerten beschreibt folgende trigonometrische Funktion (3-1), deren Herleitung für die sphärische Zentralprojektion im Anhang A – Mathematische Herleitung aufgeführt ist:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC}}{\cos \psi \cdot \sin \theta_{AC} - \sin \psi \cdot \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC}} \right) + 90^\circ \quad \text{für} \quad \begin{array}{l} -180^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \\ -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{array} \quad (3-1)$$

Der grafische Funktionsverlauf ist in Abb. 3-4 für verschiedene Fluglagewinkel visualisiert.

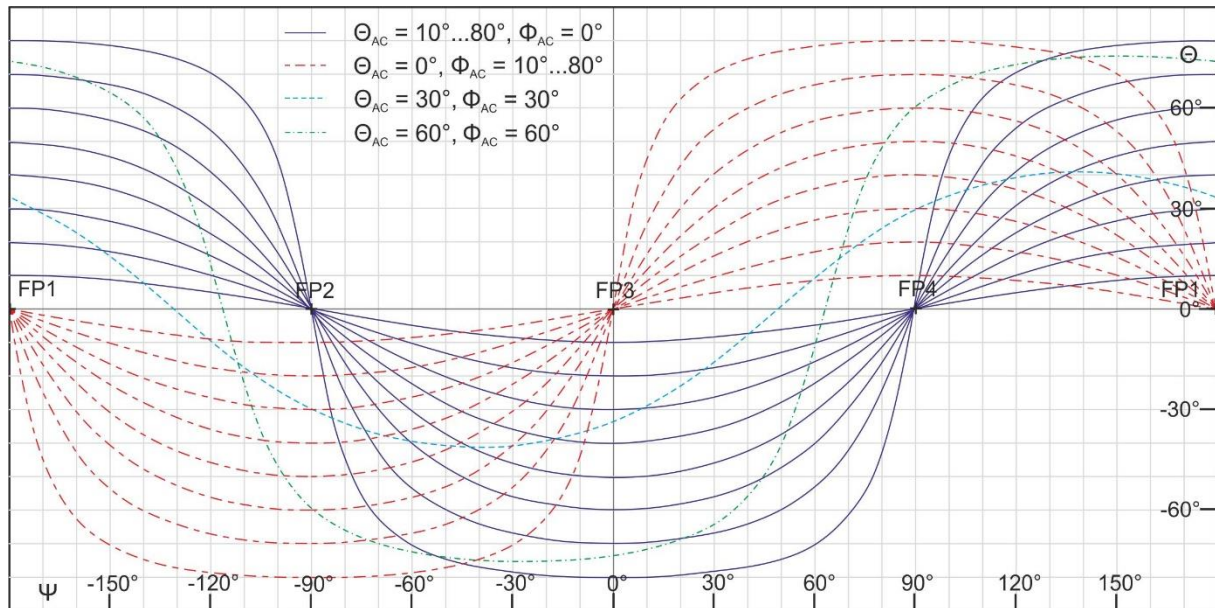


Abb. 3-4: Verlauf der Horizontlinie bei Verwendung einer sphärischen Zentralprojektion in Abhängigkeit der Fluglagewinkel Θ_{AC} und Φ_{AC} (Abstand zum Boden beträgt 0 m)

Um die Horizontlinie der realen Wahrnehmung entsprechend geradlinig abzubilden, ist ein anderes Bezugssystem zu wählen. Bei diesen müssen Roll- und Nickwinkel der virtuellen Kamera Null betragen. Einen Lösungsansatz beschreibt die Verwendung eines **heterozentrischen, NED-zentrierten** Bezugsrahmens, bei dem die virtuelle Kamera mit der Flugzeugposition mitgeführt wird und deren Ausrichtung sich am lokalen NED-System orientiert (Kap. 2.1.2.2). Sämtliche Fluglagewinkel werden bei dieser Darstellungsart rein exozentrisch, also im Sinne eines Outside-In Displays und einer nordzentrierten Karte, dargeboten (Abb. 3-5, oben links).

Eine Mischform bezüglich der Darbietung von Fluglagewinkeln beschreiben Panoramen mit dem Heading Down System als Bezugsrahmen (Kap. 2.1.2.3). Bei dieser **kurswinkelzentrierten** (HD-zentriert) Darstellung werden Kurswinkel egozentrisch, Nick- und Rollwinkel exozentrisch abgebildet. Dadurch befindet sich die aktuelle Kursrichtung stets in der horizontalen Displaymitte (Abb. 3-5, oben rechts).

Des Weiteren besteht die Möglichkeit die kurszentrierte Darstellung so zu modifizieren, dass auch Nick- und Rollwinkel egozentrisch abgebildet werden. Die Proportionen des kurszentrierten Abbildes bleiben dabei erhalten, weshalb der Horizont weiterhin eine gerade Linie beschreibt. Durch Verschiebung und Rotation der gesamten Abbildung werden Nick- und Rollwinkel indiziert (Abb. 3-5, unten). Diese sogenannte kurs-, nick- und rollwinkelzentrierte Darstellungsart ähnelt sehr der konventionellen egozentrischen Darstellung. Sie bildet jedoch stets einen Kompromiss zwischen einer effektiven Ausnutzung der Darstellungsfläche und der Entstehung nichtsichtbarer Raumsegmente. Ferner sind Raumlagewinkel externer Objekte aufgrund der rotierten Darstellung schwieriger zu erfassen. Diese modifizierte egozentrische Darstellungsart wird daher als ungeeignet betrachtet.

Für die Anwendung in einer Panoramaprojektion verbleiben somit nur der NED-zentrierte und der kurswinkelzentrierte Bezugsrahmen. Analog der Wahloption einer north-up oder track-up Karte, sollte der Pilot auch bei der Panoramaprojektion die horizontale Ausrichtung selbst bestimmen können, beispielsweise durch eine Schaltfläche zum Umschalten zwischen beiden Bezugssystemen.

Problematisch beim NED-zentrierten Bezugsrahmen ist die Diskontinuität der Azimutskala am seitlichen Displayrand. Bei eigenen Kurswinkeln Richtung Süden (180°) kann es schon bei geringen Schwankungen zu Sprüngen des Fluglageindikators am seitlichen Displayrand kommen. Um diesen Effekt zu begegnen, erfolgt für Kurswinkel in Richtung der nördlichen Hemisphäre die Ausrichtung nordzentriert, für Kurswinkel in die südliche Hemisphäre südzentriert.

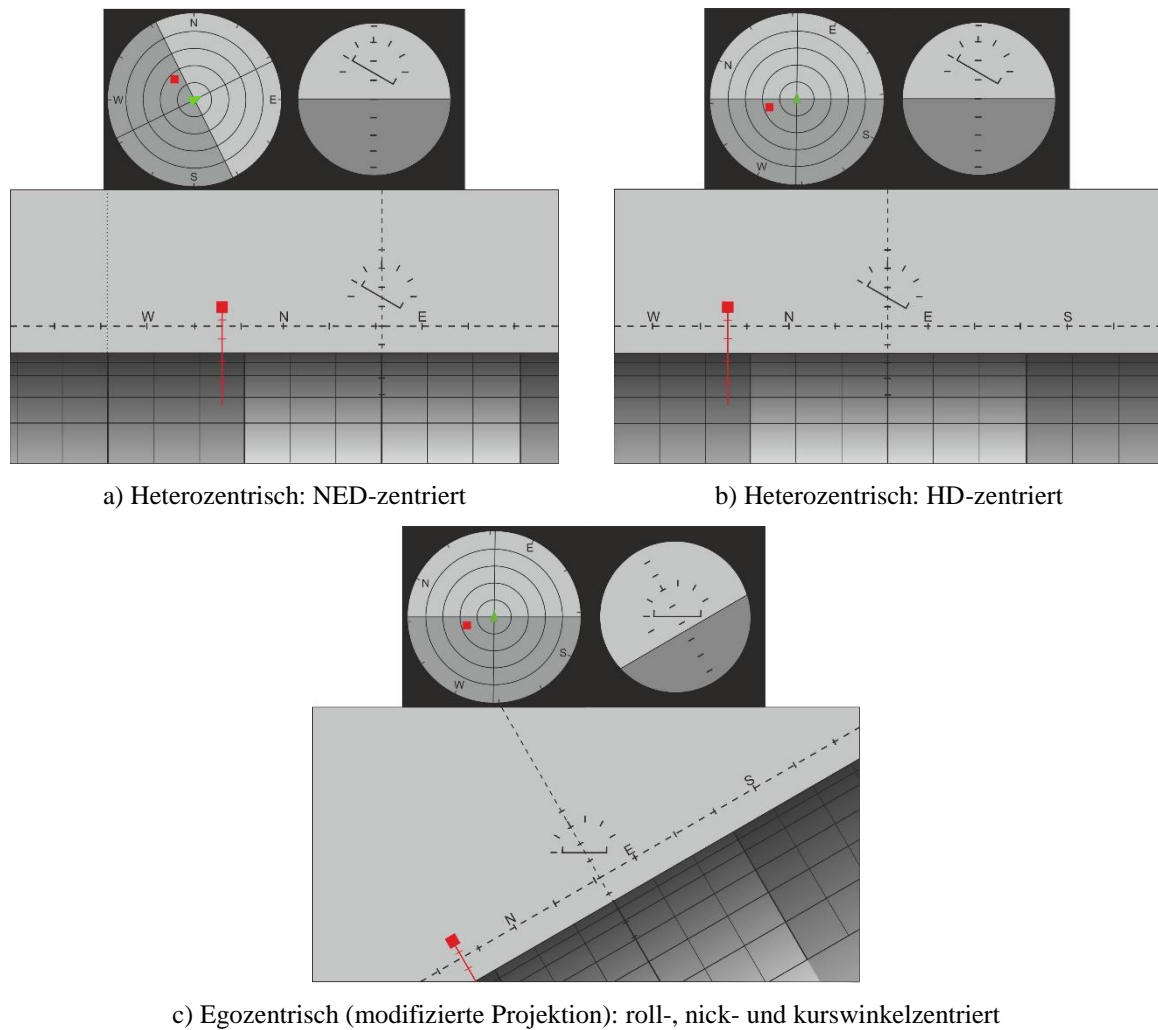


Abb. 3-5: Darstellung der sphärischen Panorama Projektion mit verschiedenen Bezugssystemen

3.2.3. Tiefenschlüssel und Subskalen

Durch die sphärische Zentralprojektion werden Azimut- und Elevationswinkel über Linearskalen entlang der Displayhauptachsen eindeutig abgebildet. Um jedoch dreidimensionale Koordinaten vollständig zu vermitteln, muss die sphärische Zentralprojektion einen perspektivischen Charakter besitzen. Das heißt, die Vieldeutigkeit (Kap. 2.4.3) entlang der Sichtlinie muss wie bei anderen perspektivischen Darstellungen auch dekodierbar sein. Im Hinblick auf die Übermittlung von Zylinderkoordinaten, bei denen neben Azimutwinkeln auch horizontale und vertikale Entfernungsmaße von Interesse sind, müssen zur Dekodierung zwei zusätzliche Subskalen in die Abbildung integriert werden.

Dies soll durch die Verwendung von **Objektloten** in Kombination mit einer **Referenzebene** geschehen, die auf Meereshöhe positioniert wird. Die Referenzebene repräsentiert die zu einer planaren Ebene transformierte Erdoberfläche und ist Träger einer Subskala (Kap. 2.3.4). Die Subskala ist in Form eines **zweidimensionalen, polaren Koordinatensystems** ausgeführt. Von der Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems wird abgesehen. Dieses hat sich in einem Vorversuch bei der Erfassung von Zylinderkoordinaten aufgrund eines im Vergleich zum polaren Koordinatensystem deutlich erhöhten Wiedergabefehlers als ungeeignet erwiesen [142]. Die Projektion beider Referenzgitterarten ist in Abb. 3-6 grafisch visualisiert.

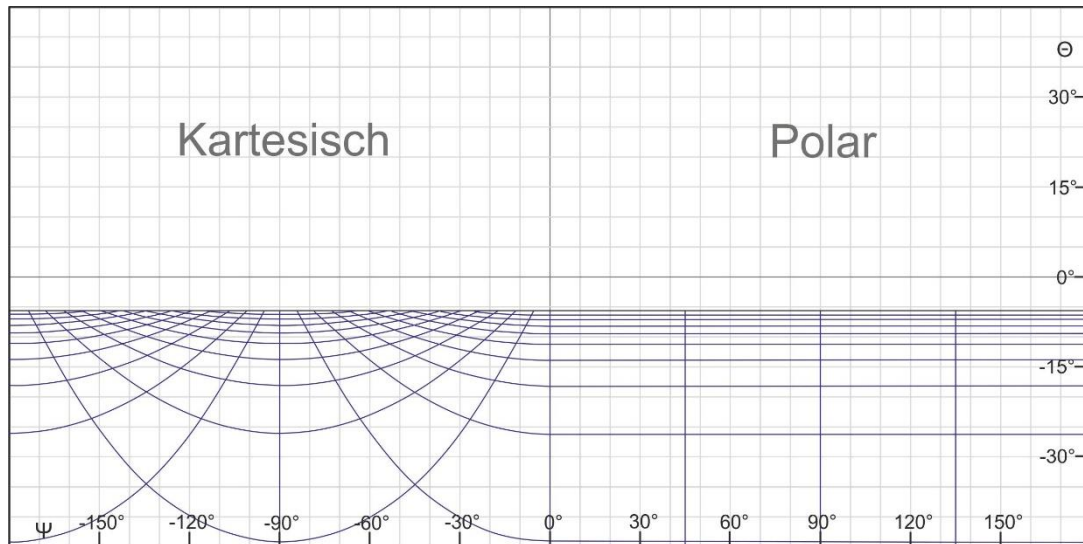


Abb. 3-6: Darstellung eines kartesischen und eines polaren Referenzgitters mit einer sphärischen Zentralprojektion

Objektlote verbinden die Objekte mit deren Fußpunkt auf der Referenzebene und dienen als Träger einer zweiten Subskala. Durch diese grafischen Hilfsmittel können dreidimensionale Zylinderkoordinaten im Raum eindeutig dargestellt werden. Ferner soll der perspektivische Eindruck durch die Verwendung zusätzlicher Tiefenschlüssel, wie relative Größe, gradueller Farbverlauf oder das gegenseitige Verdecken von Objekten (Kap. 2.4.3), verstärkt werden.

3.2.4. Grafische Gestaltung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die grafische Gestaltung der Panoramadarstellung definiert. Neben allgemeingültigen Gestaltungsrichtlinien für Cockpitanzeigen, wie Funktionalität, Erlernbarkeit, Steuerbarkeit, Fehlerrobustheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Individualisierbarkeit und Erwartungskonformität [143], werden Designprinzipien zur Förderung von Situationsbewusstsein berücksichtigt. Zusätzlich werden Forderungen beachtet, die aus flugzeugmusterspezifischen Gestaltungsrichtlinien resultieren.

In Kapitel 3.1.2 wurden Größe und Geometrie des für den Eurofighter entworfenen Großflächen-displays beschrieben. Die Displayabmessungen wurden aus den physikalischen Gegebenheiten der aktuellen Cockpitkonfiguration angepasst. Bei maximalem horizontalem und vertikalem Blickfeld sollen die Displayauflösungen für die azimutale und elevationale Dimensionen jeweils identisch sein. Das **Formatseitenverhältnis** der Abbildung muss somit 2:1 betragen.

Die **farbliche Gestaltung** des Panoramaformats soll sich an den Vorgaben bereits existierender Raumformate orientieren. Diese sind auch entsprechend der vierten Gestaltungsrichtlinie von Endsley [8] ausgelegt. Sie besagt, dass kritische Signale salient hervorzuheben sind, um eine Priorisierung verschiedener Ziele in kritischen Situationen zu erleichtern. Laut Evreinova [144] besitzt farbliche Salienz dafür eine besondere Eignung. Um inflationären Effekten beim Lenken von Aufmerksamkeit entgegenzuwirken, ist im Umgang mit Farbe daher nach dem Grundsatz: "weniger ist mehr" zu verfahren. Zudem werden Signalfarben entsprechend ihrer semantischen Bedeutung eingesetzt. Nominales Verhalten sollte beispielsweise mit grüner Farbe visualisiert werden, wohingegen nicht-nominales Verhalten gelb und drohende Gefahr rot hervorgehoben werden sollten [145].

Bezüglich der dargestellten Informationsmenge ist die fünfte Gestaltungsrichtlinie von Endsley zu berücksichtigen. In dieser wird empfohlen, auf die Darstellung **unwichtiger Informationen**, die nicht zur Generierung von Situationsbewusstsein erforderlich sind, zu verzichten. Für räumliche Formate bedeutet dies einerseits, dass Projektionsparameter, wie die Skalierung oder das Blickfeld, veränderlich sein müssen. Andererseits muss die Option bestehen, überlagerte Informationsebenen nach Bedarf ein- oder auszublenden sowie deren Detaillierungsgrad zu modifizieren.

Aufgrund der leichteren Identifizierbarkeit (Kap. 2.5.6) werden zweidimensionale **Objektsymbole** dreidimensionalen vorgezogen. Alle Objektsymbole sollen entsprechend der Eurofighter Designrichtlinien sowohl durch ihre Farbe, als auch durch ihre Form kodiert werden. Die Kennzeichnung einzelner Objektsymbole muss über Buchstaben erfolgen. Zusätzlich sind Indikatoren in die Abbildung zu integrieren, welche in Form eines Geschwindigkeitsvektors die zukünftige Bewegungsrichtung des jeweiligen Objektes beschreiben.

Die **eigenen Flugparameter**, Geschwindigkeit, Höhe, Kurs-, Nick- und Rollwinkel müssen sich qualitativ, ohne digitale Anzeigen, aus der Darstellung ableiten lassen.

3.2.5. Variable Projektionsparameter

Neben der optionalen Ein- und Ausblendung überlagerter Informationsebenen kann das Panoramaformat durch die Modifikation der variablen Projektionsparameter angepasst werden. Der Pilot kann dadurch situationsabhängig eine für ihn optimale Darstellungsart wählen. In Möller [141] wurden die Projektionsparameter ausführlich analysiert und beschrieben. Zudem wurde im Rahmen einer Pilotenbefragung ermittelt, inwieweit diese Parameter durch den Anwender manuell oder durch eine Systemlogik automatisiert manipulierbar sein sollen [141].

Die beiden wichtigsten Projektionsparameter der virtuellen Kamera, die in diesem Zusammenhang zu nennen sind, sind das horizontale und das vertikale Kamerablickfeld (GFOV). Sie bestimmen die Größe des dargestellten Raumsegmentes durch Änderung der Displayskalierung der azimuthalen und elevationalen Winkelkoordinaten. Insbesondere bei der vertikalen Raumdimension stellte sich heraus, dass nicht immer die Darstellung des maximalen Blickfeldes von 180° zielführend ist. Als Begründung wurde aufgeführt, dass die horizontale Dimension des interessierenden Raumes die vertikale Dimension um circa eine Größenordnung übersteigt. Nicht sichtbare Raumsegmente im Nahbereich werden daher zugunsten einer höheren Auflösung des zentralen Displaybereichs und somit weit entfernter Raumsegmente in Kauf genommen.

Der Einfluss des Skalierungsverhältnisses von horizontalem zu vertikalem Blickfeld auf die Leistung beim Verständnis von Objektpositionen wurde von Möller [142] untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass ein Skalierungsverhältnis ungleich eins keine bedeutsamen negativen Auswirkungen hat. Daher ist die Möglichkeit einer unabhängigen Anpassung von **horizontalem und vertikalem Blickfeld** vorzusehen.

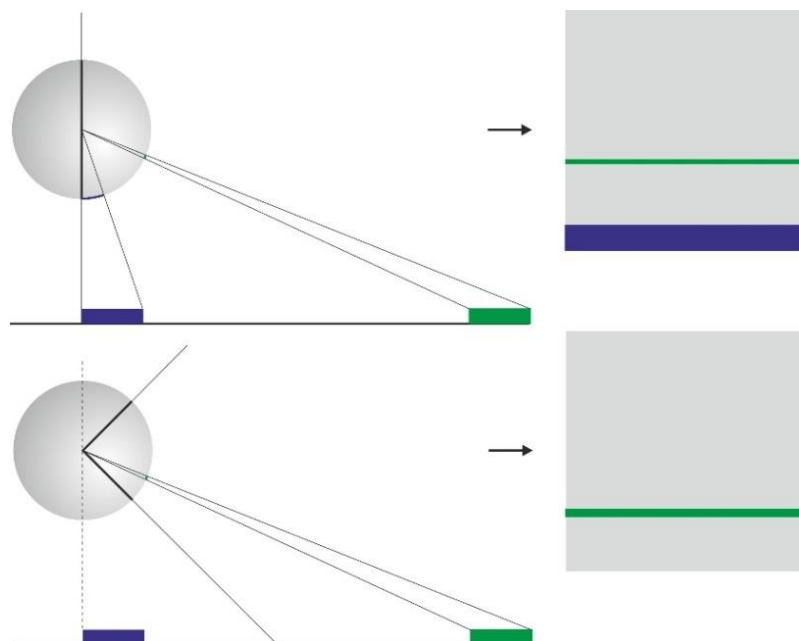


Abb. 3-7: VFOV als Projektionsparameter (oben 180° , unten 90°)

Die **Projektionshöhe** ist ein Parameter, der aufgrund des heterozentrischen Bezugsrahmens inhärent an den eigenen Flugzustand geknüpft ist. In niedriger Höhe ist der Blickwinkel auf den Nahbereich der Referenzebene groß (Abb. 3-8). Auf den Fernbereich ist er hingegen niedrig. Dies wirkt sich direkt auf die Auflösung von Entfernungs- und Höhenskalen in diesen Bereichen aus. Analog egozentrischer Perspektiven können Positionen weit entfernter Objekte daher nur ungenau erfasst werden, während dies bei Positionen naher Objekte sehr exakt möglich ist. Mit zunehmender Kamerahöhe gleichen sich die Auflösungen naher und entfernter Gebiete auf der Referenzebene einander an. Raumsegmente im Fernbereich werden somit höher aufgelöst, weshalb Objekte in diesem Bereich genauer erfasst werden können. Um diesen Effekt optimal zu nutzen, empfiehlt Bogachev [146] eine höhenabhängige Skalierung von Entfernungen auf der Referenzebene.

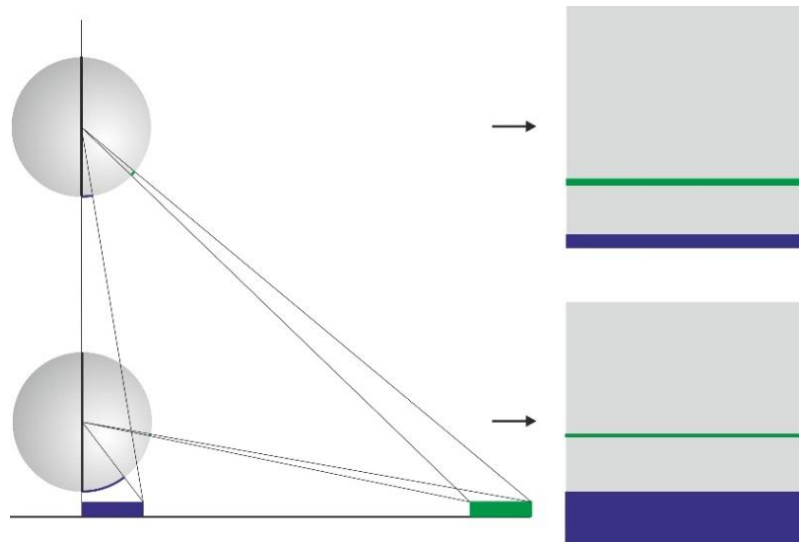


Abb. 3-8: Kamerahöhe als inhärenter Projektionsparameter (oben große Höhe, unten niedrige Höhe)

Ein anderer Projektionsparameter, dessen Relevanz nur für vertikale Blickfelder kleiner als 180° besteht, ist die **vertikale Ausrichtung des Projektionszentrums** (Abb. 3-9). Diese beträgt gegenüber der Äquatorialebene im Regelfall 0° , sodass die Linie der eigenen Flughöhe in der Bildmitte erscheint. Ein vertikales Blickfeld von 90° weist dabei eine obere Grenze von 45° und eine untere von -45° auf. Befindet man sich in großer Flughöhe, ist jedoch primär das Raumsegment unterhalb der eigenen Höhe von Interesse, da Flugobjekte nicht in beliebig großen Höhen anzutreffen sind. In diesem Fall kann das vertikale Blickfeld entlang des gesamten horizontalen Kugelumfangs nach unten geschwenkt werden. Wird es beispielsweise um 15° nach unten geschwenkt, betragen dessen Ausschnittsgrenzen gegenüber der Horizontalebene -60° und 30° . Bei Flügen in niedriger Flughöhe kann es genauso nach oben geschwenkt werden.

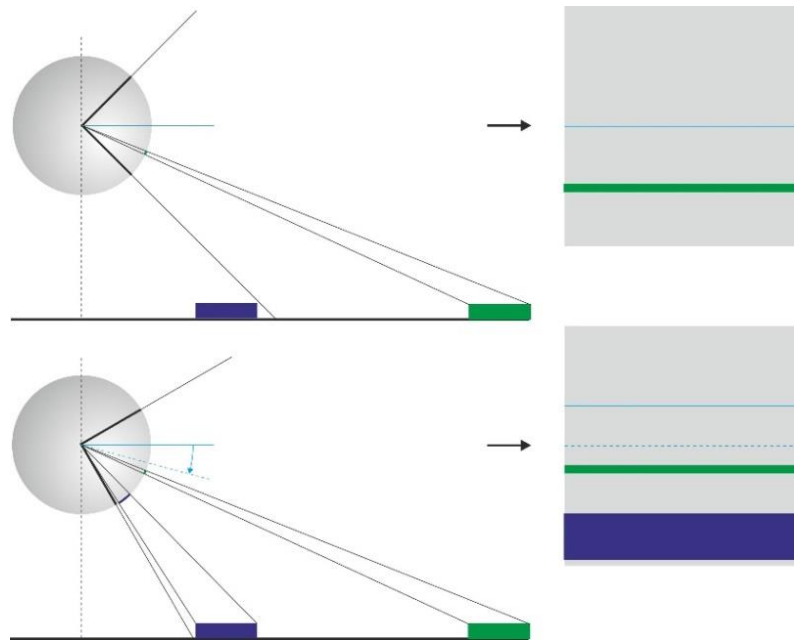


Abb. 3-9: Vertikale Ausrichtung des Projektionszentrums (oben 0°, unten -15°)

Neben der Skalierung der Winkelmaße kann auch eine **Entfernungsskalierung** in radialer horizontaler Richtung nützlich sein. Auf diese Weise ist es möglich, weit entfernte Objekte näher erscheinen zu lassen und umgekehrt. Da dies eine Änderung des Krümmungsverlaufes der Kugel zu einer Ellipse oder anderem Rotationskörper voraussetzt, werden Elevationswinkel in der Abbildung jedoch nicht mehr linear aufgelöst.

3.3. Designentwurf des Panoramaformats

Im vorherigen Kapitel wurden grundlegende funktionale Anforderungen an das neuartige Panoramaformat beschrieben. Ferner wurden Projektionsparameter festgelegt und die grafische Gestaltung definiert. Die Beschreibung des daraus abgeleiteten Designentwurfs (Abb. 3-10) ist Gegenstand dieses Kapitels.

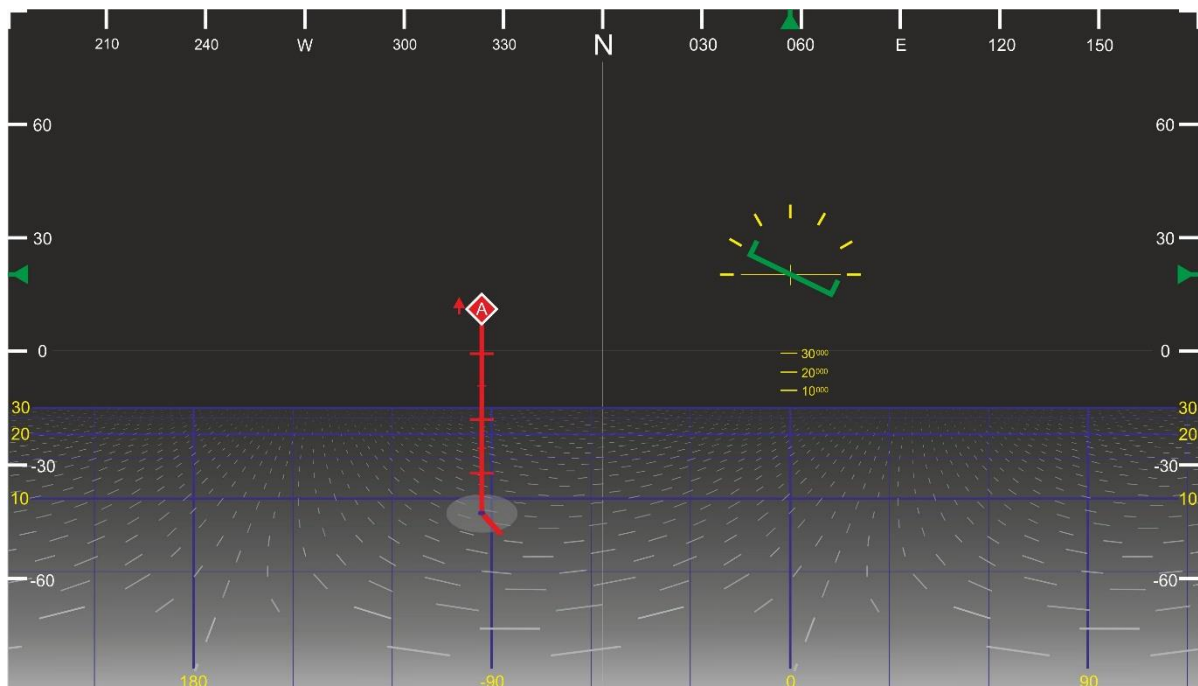


Abb. 3-10: Designentwurf der Panoramaansicht mit Flugführungshilfe

Der abgebildete Designentwurf basiert auf einer sphärischen Panoramaprojektion. Das horizontale Blickfeld beträgt 360° , das vertikale 180° . Beide umgebenden Hemisphären werden also vollständig dargestellt. Darstellungen mit kleineren Blickfeldern werden an die zur Verfügung stehende Displayfläche angepasst.

Die Ausrichtung der virtuellen Kamera ist NED-zentriert, weshalb der Raumlagewinkelindikator des eigenen Flugzeuges exozentrischen Bezug besitzt. Die Kamerahöhe und die eigene Flughöhe sind identisch. Sie beträgt in diesem Fall knapp über 30 000 ft. Die Erdoberfläche dient als Referenzebene zur Dekodierung der perspektivischen Vieldeutigkeit. Sie ist zu einer planaren Ebene transformiert, welche die Erdoberfläche im Lotfußpunkt der eigenen Position berührt.

Am oberen Displayrand befindet sich ein Kompass zur Ermittlung absoluter Azimutwinkel. Dessen Skalenauflösung beträgt 30° . Über weitere Winkelskalen am linken und rechten seitlichen Displayrand mit einer identischen Auflösung können relative Elevationswinkel erfasst werden. Auf der Referenzebene ist ein flugzeugzentriertes, polares Koordinatensystem positioniert, das egozentrische Entfernungen in Schritten von 5 NM bis zu einer Maximalentfernung von 30 NM Meilen darstellt. Des Weiteren dient die Winkelskala des Polarkoordinatensystems zur Visualisierung relativer Objektazimutwinkel. Auch diese ist in 30° Schritten aufgelöst.

Horizontale Objektpositionen werden über Lote und deren Fußpunkte auf der Referenzebene eindeutig visualisiert. Zur Bestimmung absoluter Objekthöhen sind Skalen in die Lote integriert. Zwei benachbarte große Marker beschreiben eine Höhendifferenz von 10 000 ft, der Abstand zwischen einen großen und einen benachbarten kleinen Marker beschreibt eine Höhendifferenz von 5000 ft. Um die Erfassung relativer Objekthöhen zu erleichtern, werden Lote stets auch dann bis zur eigenen Höhe gezeichnet, wenn sich Objekte unterhalb dieser befinden. Die relative Fluggeschwindigkeit von Objekten wird in der Horizontalebene durch einen Vektor und einen Referenzkreis am Lotfußpunkt visualisiert, in der Vertikalebene durch pfeilförmige Steig- oder Sinkindikatoren. Der Radius des Referenzkreises am Lotfußpunkt entspricht einer konstanten Referenzgeschwindigkeit und hilft bei der Interpretation der Länge des Geschwindigkeitsvektors.

Zur Verstärkung des perspektivischen Charakters der Darstellung werden Objekte entsprechend ihrer Entfernung verschieden groß dargestellt. Objekte im Nahbereich können dabei weiter weg gelegene Objekte verdecken. Zusätzlich besitzt die Referenzebene in radialer Richtung einen transienten graustufigen Farbverlauf, dessen Schwarztönung mit zunehmender Entfernung steigt.

Die Lagewinkel des eigenen Flugzeuges werden durch einen Outside-In Indikator grafisch visualisiert. In Kombination mit dem Kompass am oberen Displayrand und den Winkelskalen am seitlichen Displayrand können eigene Kurs- und Nickwinkel ermittelt werden. Der Rollwinkel wird über eine mit dem Indikator mitgeführte kreisförmige Winkelskala dargestellt.

Die eigene Flughöhe kann aus dem relativen Abstand der 30 NM Entfernungslinie und der Linie der eigenen Höhe, der Äquatoriallinie, qualitativ ermittelt werden. Die Äquatoriallinie beschreibt eine horizontale Gerade mit einem Elevationswinkel von 0° . Die eigene Geschwindigkeit samt Bewegungsrichtung wird hingegen über ein sich auf der Referenzebene befindendes Flusslinienfeld grafisch visualisiert.

Die für Hintergrund, Beschriftungen, Skalen und Objekte verwendeten Farben orientieren sich an den Konventionen der Gestaltung von Eurofighter-Raumformaten [147]. Der Formathintergrund ist schwarz. Unbewegte Skalen sind in weißer, bewegte Skalen sind in gelber Farbe ausgeführt. Gitternetzlinien werden in blau dargestellt. Das eigene Flugzeugsymbol, in diesem Fall der Indikator der Fluglage, ist grün. Objekte und Objektlotlinien sind, nach absteigender Kritikalität, rot, gelb oder grün gestaltet.

In diesem Designentwurf können je nach zu bearbeitender Aufgabe natürlich auch zusätzliche Informationen integriert werden. Eine sinnvolle Option zur Unterstützung der Bildung von Terrain Awareness ist die Darstellung von Geländeinformationen [146] [148] [149] [150]. Dies kann beispielsweise bei der Prävention von CFIT Unfällen, aber auch bei navigatorischen und taktischen Überlegungen nützlich sein. Für die manuelle Flugführungsaufgabe können neben dem Fluglageindikator zusätzlich ein Prädiktor und eine Solltrajektorie, beispielsweise in Form eines Tunnels, in die

Abbildung integriert werden. Zur Unterstützung navigatorischer Aufgaben kann hingegen die Darstellung von Wegpunkten und topografischen Informationen hilfreich sein.

Für taktische Aufgaben können der Panoramaansicht Video-, Radar- oder Infrarot Sensorbilder überlagert werden. Die Integration von Markern zur Objekterfassung und Indikatoren von Reichweiten eigener Flugkörper ist ebenfalls möglich.

3.4. Besonderheiten der Darstellung

Durch die nichtlineare Abbildungsvorschrift der sphärischen Zentralprojektion lassen sich weitwinklige Blickfelder und sogar Panoramadarstellungen realisieren. Daraus resultierend ergeben sich einige Besonderheiten bezüglich des Erscheinungsbildes geometrischer Figuren und dem Verhalten dynamischer Objekte. Diese werden in den folgenden drei Kapiteln erläutert.

3.4.1. Geometrische Aspekte

Geraden des abzubildenden Raumes erscheinen in der Abbildung einer sphärischen Zentralprojektion nur dann als Geraden, wenn sie sich innerhalb einer Ebene befinden, die durch zwei Radiale gleicher Azimutwinkel oder durch zwei Radiale gleicher Elevationswinkel aufgespannt wird. In diesem Fall verlaufen sie vertikal oder horizontal. Aus diesem Grund werden Objektlote stets als vertikale Geraden dargestellt. Radial verlaufende Geraden erscheinen in der Abbildung punktförmig. Alle anderen Geraden werden als nichtgeradlinige Kurven dargestellt. Horizontal verlaufende Kreise, die sich bezüglich des Projektionszentrums konzentrisch verhalten, erscheinen hingegen in Form horizontal verlaufender Geraden.

Diese geometrischen Besonderheiten führen unter anderem dazu, dass das flugzeugzentrierte Polarkoordinatensystem der horizontalen Referenzebene, bestehend aus Radialen und konzentrischen Kreisen, als geradliniges, rechtwinkliges Koordinatensystem abgebildet wird (Abb. 3-6). Zylindrische Komponenten egozentrischer Objektrelationen werden daher gut lesbar visualisiert.

Andere interessante Phänomene werden durch den perspektivischen Charakter der Darstellung verursacht. Analog zu konventionellen perspektivischen Darstellungen nimmt auch bei der sphärischen Zentralprojektion die Auflösung von Längenskalen mit zunehmender Entfernung vom Projektionszentrum ab. Da dies für alle drei Raumdimensionen gilt, verhalten sich sowohl die horizontale Entfernungsskala der Referenzebene als auch die Höhenskalen der Objektlote nichtlinear. Einen besonderen Einfluss auf diesen Effekt hat die eigene Flughöhe bezüglich der Darstellung horizontaler Entfernungen durch die Referenzebene. In niedrigen Flughöhen wird die Nichtlinearität dieser Längenskalen verstärkt, in großen Flughöhen abgeschwächt. Das heißt, in niedrigen Flughöhen wird der Nahbereich der horizontalen zu Lasten des Fernbereichs besonders hoch aufgelöst (Kap. 3.2.5).

Durch die Verwendung von Objektsymbolen, die aufgrund der Formkodierung eine Mindestgröße aufweisen müssen, kann es bei der Darstellung bestimmter Objekthöhen zudem vorkommen, dass einzelne Marker der Höhenskala vom Objektsymbol verdeckt werden.

Eine weitere Besonderheit betrifft die Darstellung von Winkelmaßen. Azimut- und Elevationswinkel werden nicht wie bei Hauptrissabbildungen über Kreisskalen, sondern über geradlinige Horizontal- und Vertikalskalen aufgetragen. Bei der Erfassung von Zylinderkoordinaten betreffen diese Besonderheiten ausschließlich Werte des Azimuts. Die Azimutskala verhält sich beim Sprung von 180° auf -180° diskontinuierlich. Soll der Azimutwert korrekt erfasst und verstanden werden, muss eine mentale Transformation eines Längenmaßes in ein Winkelmaß erfolgen. Dass Piloten dazu prinzipiell in der Lage sind, wurde im Rahmen eines Experimentes bestätigt [151]. In diesem wurden dem Probanden zwei verschiedene Ansichten präsentiert: Eine zweidimensionale Kartenansicht mit einer kreisförmigen Azimutwinkelskala und eine Panoramaansicht mit einer geradlinigen horizontalen Azimutskala. Die Aufgabe der Probanden bestand nun darin, die Azimutkoordinaten eines Objektes, welches auf den Ansichten dargestellt wurde, zu erfassen und in eine reale horizontale Raumrichtung zu übertragen. Dies erfolgte über als Winkelmarker kodierte Karten, die in 4° -Intervallen um den Probanden angeordnet waren (Abb. 3-11).



Abb. 3-11: Versuchsaufbau – Transfer der erfassten Azimutwerte in reale Raumrichtungen [eigene Bildquelle]

Das Ergebnis war hinsichtlich der Wiedergabefehler für beide Darstellungsvarianten gleich gut. Bezüglich der Wiedergabezeit wurde ein Leistungsvorteil der planaren Ansicht gegenüber dem Panoramaformat festgestellt [151].

In Kapitel 2.3.2.2 wurde zudem beschrieben, dass bei sphärischen Zentralprojektionen Abbildungen mit bis zu sechs Hauptfluchtpunkten realisierbar sind. Da beim heterozentrischen Panoramaformat die vertikale Achse des Projektionskörpers mit der dritten Hauptachse des NED- bzw. des HD-Systems zusammenfällt, werden jedoch nur maximal vier Hauptfluchtpunkte dargestellt. Diese befinden sich allesamt auf der Äquatoriallinie. Die zugehörigen Hauptfluchtlinien folgen dem Verlauf der in (3-2) dargestellten trigonometrischen Funktionen (Abb. 3-12).

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{\pm D}{h \cdot \sin \psi} \right) + \frac{\pi}{2} \\ \theta_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{\pm D}{h \cdot \cos \psi} \right) + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad \text{für} \quad \begin{aligned} -180^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \\ -90^\circ \leq \theta \leq \theta_{\text{MaxDistanz}} \end{aligned} \quad (3-2)$$

Sämtliche Hauptfluchtlinien in vertikaler Richtung sind hingegen geradlinig und verhalten sich parallel. Bei einem vertikalen Blickfeld von 180° werden der Nadir durch den unteren und der Zenit durch den oberen Abbildungsrand beschrieben. Die beiden in dieser Hauptachsenrichtung zu erwartenden Fluchtpunkte sind somit zu horizontalen Linien entartet.

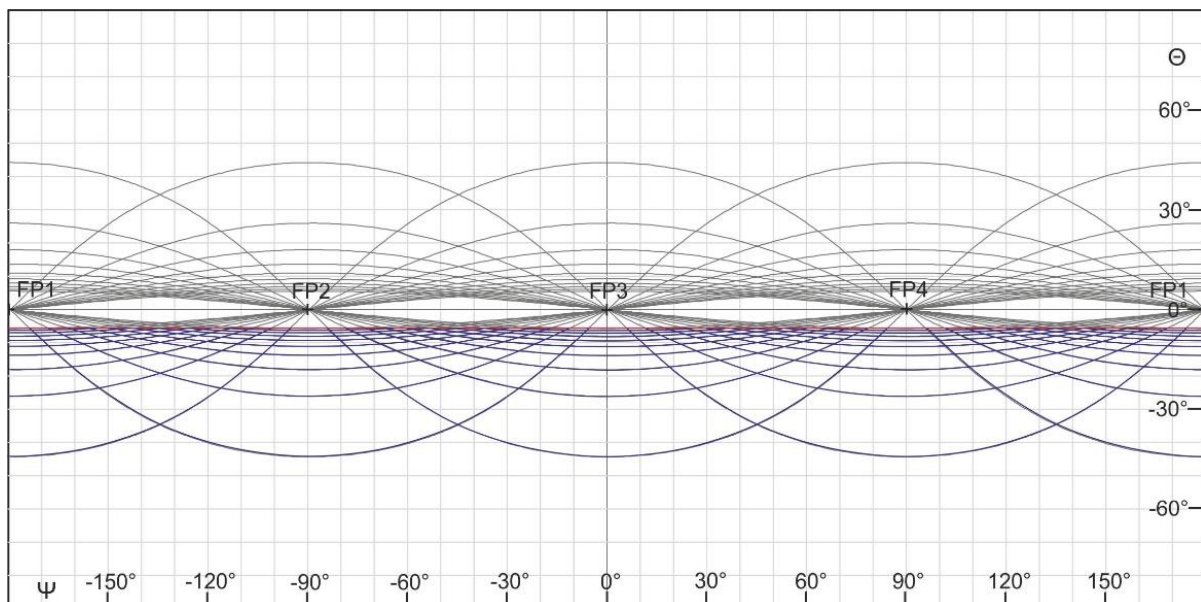


Abb. 3-12: Erscheinungsbild von Hauptfluchtlinien, die parallel zu den Raumhauptachsen 1 (x-Achse) und 2 (y-Achse) angeordnet sind und einen vertikalen Abstand h von 30 000 ft zum Projektionszentrum aufweisen.
Der horizontale Abstand zwischen benachbarten parallelen Linien beträgt jeweils D = 5 NM
(Anhang A – Mathematische Herleitung)

3.4.2. Dynamische Aspekte

Neben geometrischen Aspekten verdient auch die Dynamik des Panoramaformats eine gesonderte Betrachtung. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die dargestellte Geschwindigkeit von Objektsymbolen auf dem Display.

Bei zentral projizierten Abbildungen ist der Betrag der Geschwindigkeit des Objektsymbols abhängig von dessen Entfernung zum Projektionszentrum, also zum eigenen Flugzeug. Bei gleicher realer Geschwindigkeit erscheinen nah gelegene Objekte in der Abbildung stets schneller als weit entfernte. Dieser Effekt steht in direkter Verbindung mit der entfernungsabhängigen Auflösung von Längenskalen perspektivischer Darstellungen.

Ein anderer interessanter Punkt umfasst den Bewegungspfad in der Horizontalbewegung. Objekte, deren Lotfußpunkte sich auf dem Display nach unten bewegen, nähern sich dem eigenen Flugzeug an. Bewegt er sich nach oben, entfernt sich das Objekt. Seitliche Bewegungen indizieren Änderungsraten des relativen Azimutwinkels. Horizontale geradlinige Objektpfade des realen Raums werden daher, analog dem geometrischen Element Gerade (Vgl. Kap. 3.4.1), in der Abbildung in der Regel nicht als geradlinig dargestellt, sondern durch einen komplexen trigonometrischen Zusammenhang beschrieben.

Auch bei der Vertikalbewegung ist eine Besonderheit zu beachten. Eine positive Steigrate des realen Objektes in der Abbildung wird nicht zwangsläufig auch durch eine nach oben gerichtete Bewegung des Objektsymbols auf dem Display dargestellt. In Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit in radialer horizontaler Richtung und der relativen Höhe können sowohl steigende als auch sinkende Objekte sich in der Abbildung nach oben oder nach unten bewegen (Abb. 3-13). Sollen vertikale Objektbewegungen zuverlässig ermittelt werden, muss daher die Relativbewegung des Objektsymbols gegenüber der Lothöhenskala betrachtet werden.

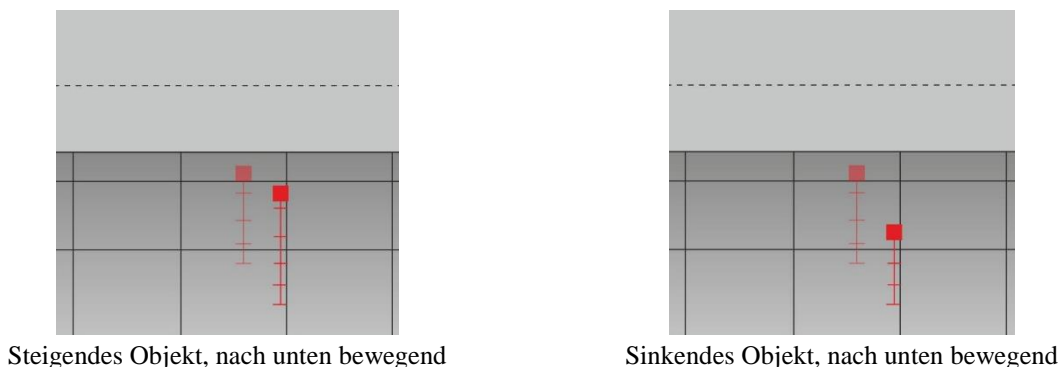


Abb. 3-13: Visualisierung von Vertikalgeschwindigkeiten

Eine weitere Besonderheit wird durch die sogenannten "stehenden Objekte" beschrieben. Stehende Objekte besitzen keine azimutale und elevationale Winkelgeschwindigkeit, obgleich ihre reale Geschwindigkeit ungleich Null sein kann. Stehende Objekte sind vor allem dann interessant, wenn sich ihr Lotfußpunkt entlang eines Radials senkrecht nach unten bewegt. Dann befinden sie sich auf Kollisionskurs zum eigenen Flugzeug. Das Verhalten des Lotfußpunktes auf der Referenzebene ist dabei ähnlich dem dynamischen Objektverhalten im zweidimensionalen B-Scope Format.

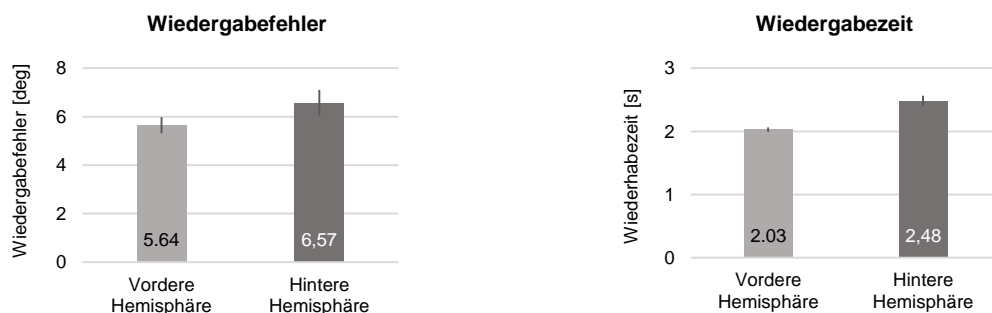
3.4.3. Hemisphäreneffekt

Das Panoramaformat erlaubt es, sämtliche Objekte des umgebenden Raumes aus der Sicht des Betrachters darzustellen. Durch den dabei zu Grunde liegenden heterozentrischen Bezugsrahmen werden Objektrelationen in ähnlicher Form abgebildet wie bei rein egozentrischen Bezugsrahmen. Es wäre daher naheliegend, dass das Panoramaformat analog egozentrischer Perspektiven die Erfassung egozentrischer Maße für konventionell große Blickfelder unterstützt.

Inwieweit diese Vermutung auch beim Transfer auf weitwinklige Perspektivdarstellungen zutrifft, wurde im Rahmen einer Studie durch Möller [142] untersucht. Die Darstellung, insbesondere einer 360°-Rundumsicht auf einem planaren Display, ist ungewohnt und erscheint unnatürlich. Eine Untersuchung, bei der Azimutwerte in reale Raumrichtungen zu übertragen waren, offenbarte hinsichtlich der Wiedergabezeit bereits ein Leistungsdefizit des Panoramaformats gegenüber einer planaren Ansicht (Kap. 3.4.1). Die Problematik des Panoramaformats besteht darin, dass Objekte der hinteren Hemisphäre durch eine Ansicht dargestellt werden, die im vorderen zentralen Gesichtsfeld des Betrachters platziert ist. Der Unterschied zwischen den abgebildeten geometrischen und dem realen Blickfeld ist sehr groß. Analog verhält es sich mit geometrischen und realen Objektazimutwinkeln. Das Ziel dieses Versuchs war es zu analysieren, inwieweit sich diese Diskrepanz auf die Leistung bei der Wiedergabe numerischer Objektkoordinaten auswirkt.

Die in dem Experiment zu bearbeitende Aufgabe bestand darin, durch das Panoramaformat dargestellte Positionen einzelner, randomisierter, unbewegter Objekte möglichst genau und schnell wiederzugeben. Die Einblendung des Raumformats erfolgte für die Dauer von 3 s. Anschließend waren die Koordinatenkomponenten relativer Azimutwinkel, relative Entfernung und absolute Höhe in grafische Antwortmasken einzutragen. Dabei wurden der Wiedergabefehler sowie die Wiedergabezeit erfasst.

Im Ergebnis war festzustellen, dass hinsichtlich des Wiedergabefehlers und der Wiedergabezeit vor allem bei der Koordinatenkomponente Azimut Unterschiede zwischen Objekten der hinteren und der vorderen Hemisphären bestehen. Objekte der hinteren Hemisphäre wurden im Schnitt um 1° weniger genau geschätzt. Zudem benötigten die Probanden für deren Wiedergabe knapp 0,5 s länger als für Objekte der vorderen Hemisphäre (Diagr. 3-1). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Verständnis von azimutalen Objektkoordinaten der hinteren Hemisphäre einen erhöhten kognitiven Aufwand der Probanden erfordert. Dieses Phänomen wird unter dem Begriff "Hemisphäreneffekt" zusammengefasst. Um diesem entgegenzuwirken, wurde von den Probanden der Vorschlag geäußert, die Grenze zwischen vorderer und hinterer Hemisphäre grafisch deutlich hervorzuheben.



Diagr. 3-1: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit (Angabe in Mittelwert/Standardfehler) in der Dimension Azimut für Objekte der vorderen und der hinteren Hemisphäre unter Verwendung eines polares Referenzgitters

3.5. Hypothesen

In den bisherigen Kapiteln wurde die Zweckmäßigkeit der Entwicklung eines neuartigen Raumformats vor dem Hintergrund der Steigerung von Raumbewusstsein des Piloten erläutert. Der Anstoß dieses anspruchsvollen Vorhabens wurde vor allem durch die heute veränderten Rahmenbedingungen im Cockpit gegeben. Im Konkreten ist dabei die Möglichkeit der Integration von Großflächendisplays zu nennen, welche die Umsetzung neuartiger Konzepte zur Visualisierung räumlicher Informationen ermöglicht.

Basierend auf den Ergebnissen einer durchgeführten HTA wurden zwei verschiedene Komponenten von Raumbewusstsein identifiziert: Einfaches und erweitertes Raumbewusstsein (Kap. 2.6). Anschließend wurden, auf Grundlage aktueller Forschungsergebnisse (Kap. 2.4), Defizite konventioneller

Raumformate hinsichtlich der Generierung und Aufrechterhaltung des Raumbewusstseins beschrieben (Kap. 2.7).

Am Beispiel eines hochagilen Flugzeuges wurden grundlegende geometrische Aspekte zur Integration eines Großflächendisplays in ein Flugzeugcockpit erläutert und ein mögliches Interaktionskonzept vorgestellt (Kap. 3.1). Die Konzeptentwicklung des neuartigen Raumformates erfolgte auf Grundlage der zuvor identifizierten Defizite konventioneller Darstellungen. Um diesen zu begegnen, wird die Verwendung einer Projektionsart vorgeschlagen, die als Anzeigeelement im Flugzeugcockpit bisher keine Anwendung findet: die heterozentrische, sphärische Zentralprojektion. Die Eigenheiten dieser Projektionsart wurden im Hinblick auf die Visualisierung des umgebenden Raumes beschrieben. In diesem Zusammenhang ist der erhöhte kognitive Aufwand bei der Erfassung von Azimutwerten infolge des identifizierten Hemisphäreneffektes zu nennen.

Aufgrund der Novität der Darstellungsart existieren bis dato keine wissenschaftlichen Untersuchungen bezüglich der Leistungsfähigkeit bei der Unterstützung von Raumbewusstsein - der Forschungsbedarf ist also sehr groß. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Teil des Forschungsbedarfs abgedeckt werden, indem die Eignung des Panoramaformats als Cockpitanzeige untersucht wird. Dies soll durch eine vergleichende Untersuchung geschehen. Als Vergleichsgrundlage dienen ein zweidimensionales, koplanares und ein dreidimensionales, exozentrisches Format. Beide Darstellungsformen finden in der Fliegerei bereits verbreitet Anwendung.

Es ist davon auszugehen, dass das Panoramaformat entsprechend dem zu bearbeitenden Aufgabentyps und der dazu benötigten Informationselemente, sowohl Vorteile als auch Defizite gegenüber konventionellen Cockpitdarstellungen besitzt. Das Ziel der Untersuchung ist es zu ermitteln, in welchen Bereichen die Stärken und Schwächen der neuartigen Ansicht liegen.

Der Vorteil der Panoramaprojektion bezüglich der Generierung von einfachem Raumbewusstsein gegenüber den anderen beiden Darstellungsarten wird an dieser Stelle als erwiesen angenommen. Im Grunde stellt das Panoramaformat ein weitwinkliges Flugführungsformat dar, auf dem Fluglagewinkel, Trajektorien sowie horizontale und vertikale Ablagen von Trajektorien einfach und genau erfasst werden können (Kap. 2.5.3). Das Darstellungsprinzip entspricht aufgrund des heterozentrischen Bezugssystems einem Outside-In Display. Auch andere Zustandsgrößen, wie die eigene Flughöhe und die Fluggeschwindigkeit sind aus dem Verlauf und der Bewegung der Bodentextur ableitbar. Das Erfassen von Fluglagewinkeln ist mit einer exozentrischen Darstellung hingegen nur sehr ungenau möglich und erfordert mentale Transformationen. Ähnliches gilt für Trajektorien und Ablagen von diesen. Bei zweidimensionalen, koplanaren Darstellungen sind hingegen mindestens drei verschiedene Ansichten nötig, um Fluglagewinkel, Trajektorien und Ablagen in allen drei Raumdimensionen zu visualisieren. Dies führt zu einer immensen Beanspruchung visueller und kognitiver Ressourcen der Piloten.

Basierend auf dieser Annahme wird die Untersuchung auf das erweiterte Raumbewusstsein beschränkt. Wie in Kapitel 2.6 beschrieben, erfordert die Generierung von **erweitertem Raumbewusstsein** je nach zu bearbeitender Aufgabe die Kenntnis egozentrischer oder exozentrischer Objektrelationen.

Egozentrische Objektrelationen zeichnen sich durch einen Bezug zur eigenen Position und Geschwindigkeit aus, wobei die Höhe eine Ausnahmestellung einnimmt und in der Regel auf die Erdoberfläche bezogen wird. Im operativen Flugbetrieb werden sie vornehmlich in Zylinderkoordinaten angegeben. Exozentrische Objektrelationen werden hingegen auf externe Objekte bezogen und besitzen keine Referenz zur eigenen Position.

Aufgrund der Ergebnisse des Vorversuchs (Kap. 3.2.3) wird die Verwendung eines polaren Referenzgitters, dessen Ursprung mit der eigenen Flugzeugposition zusammenfällt, gefordert. Zur Vermittlung exozentrischer Objektrelationen wird das polare Referenzgitter jedoch als ungeeignet betrachtet, da exozentrische Relativmaße nur schwer ableitbar sind. Diese werden normalerweise mit Hilfe kartesischer Koordinatensysteme oder mit Hilfe von Polarkoordinatensystemen mit einer exozentrischen Referenz vermittelt. In beiden Fällen verlaufen die Gitternetzlinien in der Abbildung der sphärischen Zentralprojektion jedoch weder geradlinig noch rechtwinklig zueinander. Das Ablesen einzelner Komponenten ist bei diesen Koordinatensystemen daher nur mit stark erhöhtem Einsatz kognitiver

Ressourcen möglich. Das Defizit des Panoramaformats hinsichtlich der Vermittlung exozentrischer Objektrelationen (Kap. 2.6) wird daher als erwiesen angenommen, weshalb auf eine gezielte Untersuchung an dieser Stelle verzichtet wird.

Die Untersuchung von erweitertem Raumbewusstsein beschränkt sich somit ausschließlich auf egozentrische Objektrelationen. Mit dem Ziel der Abdeckung verschiedener Aufgabentypen wird ein zweistufiger Evaluierungsansatz gewählt. In einer ersten Untersuchung muss der Proband numerische Koordinatenkomponenten aktueller und zukünftiger, egozentrischer Relativpositionen wiedergeben. Diese **Positionswiedergabeaufgabe** erfordert die mentale Transformation von Displaypositionen in dreidimensionale Koordinatenkomponenten des realen Raums. In der zweiten Untersuchung muss der Proband hingegen abschätzen, ob ein Objekt zukünftig in einen egozentrischen Luftraum eintritt und einen Konflikt verursacht oder nicht. Diese sogenannte **Konflikterkennungsaufgabe** erfordert keine Kenntnis exakter numerischer Koordinatenkomponenten. Stattdessen ist es ausreichend, Relativpositionen und -geschwindigkeiten qualitativ zu beurteilen.

Abb. 3-14 visualisiert den Zusammenhang zwischen dem allgemein gefassten Begriff des Situationsbewusstseins und den geplanten Versuchen. Basierend auf der Endsley'schen Kategorisierung von Situationsbewusstsein [2] wird einfaches und erweitertes Raumbewusstsein definiert. Erweitertes Raumbewusstsein wird entsprechend des Informationsbedarfs für egozentrische und exozentrische Objektrelationen unterschieden. Während die vergleichende Beurteilung der Eignung des Panoramaformats zur Generierung von einfachem Raumbewusstsein und zur Generierung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich exozentrischer Objektrelationen mit Hilfe der vorhandenen Erkenntnisse möglich ist, werden zur Abschätzung des erweiterten Raumbewusstseins hinsichtlich egozentrischer Objektrelationen zwei Untersuchungen durchgeführt.

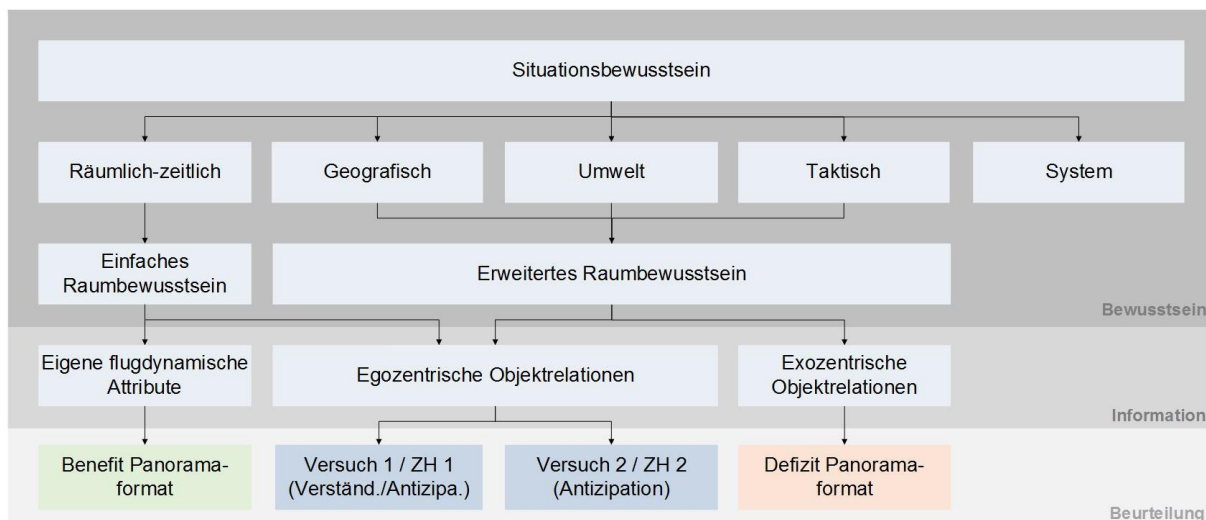


Abb. 3-14: Übersicht über die Kategorisierung von Situationsbewusstsein und Ableitung der Untersuchungen

Im Rahmen des ersten Versuchs wird sowohl die Verständnis- als auch Antizipationsleistung von erweitertem Raumbewusstsein untersucht. Dies wird durch eine **Positionswiedergabeaufgabe**, bei der entweder aktuelle oder zukünftige, egozentrische Objektrelativpositionen wiederzugeben sind, umgesetzt.

Aufgrund des im Vorversuch ermittelten Hemisphäreneffektes panoramaartiger Darstellungen (Kap. 3.4.3) ist davon auszugehen, dass das Panoramaformat diese Aufgabe nicht, wie ursprünglich erhofft, unterstützt. Stattdessen wird ein Leistungsvorteil konventioneller Anzeigen gegenüber dem Panoramaformat erwartet.

Es wird folgende Zentralhypothese abgeleitet:

ZH 1) *Verglichen mit konventionellen Anzeigen wirkt sich das Panoramaformat bei der Generierung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich der Erfassung numerischer Werte von egozentrischen Objektrelationen nicht unterstützend aus.*

Zur Prüfung der Zentralhypothese werden Einzelhypothesen verfasst, die im Zuge der Untersuchung überprüft werden. Ihnen liegen sowohl objektive als auch subjektive Leistungsmaße zu Grunde. Objektive Leistungsmaße werden zur Prüfung der Zentralhypothese als hinreichend betrachtet, während subjektive Leistungsmaße lediglich zur Untermauerung der objektiv gewonnenen Erkenntnisse dienen.

Objektive Erhebung: Operationalisierung durch Wiedergabefehler und Wiedergabezeit:

H 1.1) *Die erzielte objektive Leistung hinsichtlich der Erfassung dreidimensionaler Positionskordinaten ist bei der Verwendung konventioneller Anzeigen größer als beim Panoramaformat.*

H 1.1 a) *Der Leistungsvorteil konventioneller Anzeigen gegenüber dem Panoramaformat besteht sowohl bei dem Verständnis von aktuellen als auch bei der Antizipation von zukünftigen dreidimensionalen Positionskordinaten.*

H 1.1 b) *Der Leistungsvorteil konventioneller Anzeigen gegenüber dem Panoramaformat bleibt auch bei Erhöhung des Schwierigkeitsgrades der zu bearbeitenden Aufgabe bestehen.*

Subjektive Erhebung: Operationalisierung durch Fragebögen:

H 1.2) *Die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung ist bei konventionellen Anzeigen niedriger als bei dem Panoramaformat.*

H 1.3) *Die subjektive Einschätzung hinsichtlich des generierten erweiterten Raumbewusstseins ist bei konventionellen Anzeigen besser als bei dem Panoramaformat.*

Im zweiten Versuch wird ausschließlich die Antizipationsebene von erweitertem Raumbewusstsein untersucht. Dazu sollen die Probanden bei einer Konflikterkennungsaufgabe abschätzen, ob ein Objekt zukünftig innerhalb einer begrenzten Zeitspanne in einen egozentrischen Luftraum eintritt und einen Konflikt verursacht. Da diese Aufgabe nicht zwingend eine mentale Transformation von graphischen Bildschirmpositionen in numerische Koordinatenkomponenten erfordert, wird vermutet, dass der Hemisphäreneffekt der Panoramaansicht keine leistungshemmenden Auswirkungen hat. Auch die in Kap. 3.4.2 beschriebene Krümmung geradliniger Objektpfade wird für die untersuchten, kurzen Prädiktionszeiten von maximal einer Minute als vernachlässigbar betrachtet.

Stattdessen wird erwartet, dass die Panoramaansicht aufgrund ihrer heterozentrischen Perspektivdarstellung einen leistungssteigernden Effekt hat. Dies wird mit der Tatsache begründet, dass sich egozentrische Maße in egozentrischen Ansichten besonders einfach, durch sogenannte grafische Primitive [93] darstellen lassen. Dies betrifft vor allem den egozentrischen Luftraum, dessen Darstellung in der Panoramaansicht mit einfachen grafischen Elementen erfolgt.

Es wird folgende Zentralhypothese abgeleitet:

ZH 2) *Verglichen mit konventionellen Anzeigen wirkt sich das Panoramaformat bei der Generierung von erweitertem Raumbewusstsein in Bezug auf die Antizipation von Konflikten in einem egozentrischen Luftraum unterstützend aus.*

Genau wie bei der ersten Zentralthypothese erfolgt die Prüfung der zweiten Zentralthypothese mit Hilfe von Einzelhypothesen. Diesen liegen wieder objektive oder subjektive Leistungsmaße zu Grunde, wobei nur Hypothesen, die durch objektive Maße operationalisiert werden, für eine Prüfung als hinreichend betrachtet werden.

Objektive Erhebung Hauptaufgabe: Operationalisierung durch Fehlerrate und Detektionszeit:

H 2.1) *Die erzielte objektive Leistung in Bezug auf die Antizipation von Konflikten hinsichtlich egozentrischer Lufträume ist bei Verwendung des Panoramaformats höher als bei konventionellen Anzeigen.*

H 2.1 a) *Der Leistungsvorteil des Panoramaformats gegenüber konventionellen Anzeigen bleibt bei Erhöhung des Schwierigkeitsgrades der zu bearbeitenden Aufgabe bestehen.*

H 2.1 b) *Der Leistungsvorteil des Panoramaformats gegenüber konventionellen Anzeigen bleibt bei der parallelen Bearbeitung verschiedener Zusatzaufgaben bestehen.*

Objektive Erhebung Zusatzaufgabe: Operationalisierung durch Fehlerrate:

H 2.2) *Die in den Zusatzaufgaben erzielte objektive Leistung ist unter Verwendung der Panoramaanzeige stets höher als bei konventionellen Anzeigen.*

Subjektive Erhebung: Operationalisierung durch Fragebögen:

H 2.3) *Die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung ist beim Panoramaformat niedriger als bei konventionellen Anzeigen.*

H 2.4) *Die subjektive Einschätzung hinsichtlich des generierten erweiterten Raumbewusstseins ist beim Panoramaformat besser als bei konventionellen Anzeigen.*

Die folgende Abbildung visualisiert für beide Versuche die hierarchische Dekomposition der Zentralthypothesen in die zugehörigen Einzelhypothesen. Hypothesen, die durch objektiv erhobene Daten operationalisiert werden, befinden sich in einer grünen Box, wohingegen Hypothesen, die durch subjektiv erhobene Daten operationalisiert werden, in einer blauen Box dargestellt sind.

Konzeption eines großflächigen Panoramaformats

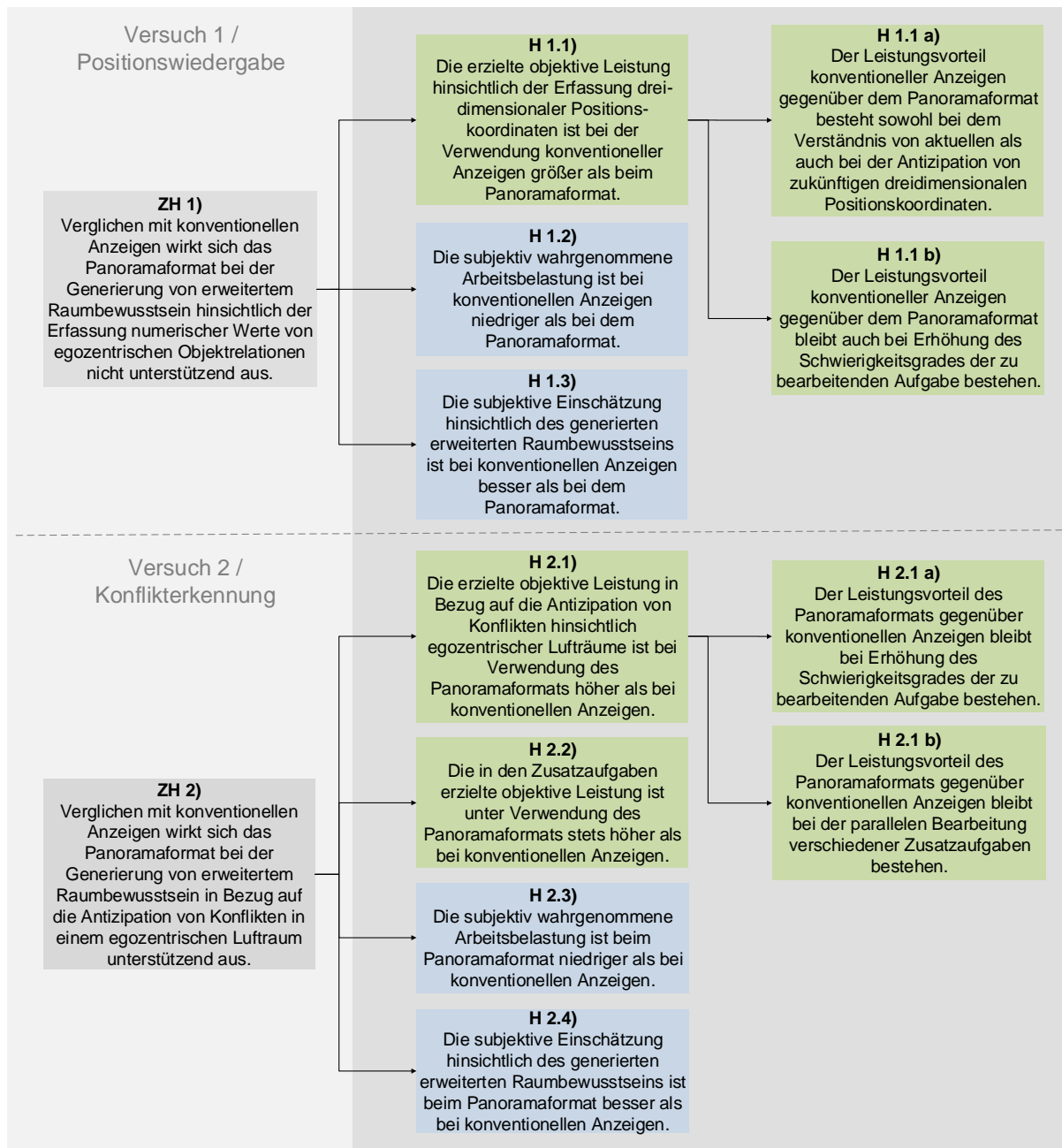


Abb. 3-15: Übersicht über die hierarchische Dekomposition der Zentralthypothesen in die zugehörigen Einzelhypothesen

4. Versuch 1: Evaluation des Positionsverständnisses

Wie den Ausführungen des vorherigen Kapitels zu entnehmen ist, beziehen sich die Forschungshypothesen auf zwei verschiedene Aufgabentypen, die erweitertes Raumbewusstsein erfordern. Die Prüfung der Hypothesen erfolgt deshalb in einem zweistufigen Vorgehen. In einem ersten Experiment wird das generierte Raumbewusstsein hinsichtlich der Fähigkeit der Erfassung exakter Objektpositionen untersucht. Die mit dem Panoramaformat erzielte Leistung wird mit der anderer Raumformate verglichen. Gegenstand dieses Kapitels ist die Beschreibung des Vorgehens bei diesem ersten Experiment. Es wird zunächst die Untersuchungsmethodik beschrieben und das Vorgehen zur Erstellung der Versuchsszenarien erklärt. In dem Kapitel Beschreibung der Raumformate werden anschließend alle verwendeten Raumformate vorgestellt. Danach werden grundlegende Aspekte der Datenerfassung erläutert. Zudem wird die bei der Untersuchung verwendete Soft- und Hardware vorgestellt. Den Abschluss bilden die Beschreibung des Versuchsablaufs und der -durchführung.

4.1. Methodik zur Ermittlung von erweitertem Raumbewusstsein

Erweitertes Raumbewusstsein als spezielle Form von Situationsbewusstsein spiegelt in diesem Kontext die Fähigkeit des Piloten wider, mit Hilfe einer Displayanzeige Objektpositionen zu erfassen, zu verstehen und zu antizipieren. Die Untersuchung, inwieweit ein Raumformat dabei unterstützend wirkt, ist jedoch nicht trivial. Gawron [152] unterscheidet insgesamt vier verschiedene Möglichkeiten Situationsbewusstsein zu bestimmen. Er nennt Leistungsmessungen und subjektive Bewertungen, aber auch Simulationen und physiologische Messungen. Zur Bestimmung von erweitertem Raumbewusstsein werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Leistungsmessungen und subjektive Bewertungen betrachtet.

Um die Qualität des neuartigen Panoramaformates zu beurteilen, wird eine vergleichende Untersuchung durchgeführt. Als Vergleichsgrundlage dienen zwei alternative Raumformate, die bereits Anwendung im Cockpit finden (Vgl. Kap. 4.3). Auf allen drei Ansichten werden dynamische Szenarien visualisiert, bei denen sich Objekte voneinander unabhängig im Raum bewegen. Die Untersuchung wird auf die Ebenen zwei und drei von Situationsbewusstsein beschränkt. Somit wird das Verständnis aktueller und die Antizipation zukünftiger Objektpositionen überprüft. Taktische und strategische Aspekte werden bei der Gestaltung der Versuchsszenarien nicht berücksichtigt. Diese würden aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete und Expertise der Probanden die Interpretation der Versuchsergebnisse unnötig erschweren. Aus diesem Grund sind die Untersuchungsszenarien einfach gehalten. Details hierzu werden in Kapitel 4.2 beschrieben. Die Aufgabe der Probanden besteht während des Versuchs darin, das Szenario aufmerksam zu beobachten und die einzelnen Objektpositionen zu verfolgen. Um dabei verschiedene mentale Belastungen zu simulieren, müssen je nach Schwierigkeitsgrad zwei, vier oder sechs verschiedene Objekte beobachtet werden. Zusätzlich dienen drei Distraktoren, die sich farblich von den zu beobachtenden Objekten absetzen, als Störfaktor der visuellen Ablenkung.

4.1.1. Leistungsmessung

Die wahrscheinlich bekannteste, leistungsbasierte Methode zur Bestimmung von Situationsbewusstsein ist die Situation Awareness Global Assessment Technique, kurz SAGAT genannt [153]. Als Grundlage dieser Untersuchungsmethodik dienen meist dynamische Szenarien, die zu beobachten sind. Zur Überprüfung des Situationsbewusstseins werden die Szenarien zu zufällig gewählten Zeitpunkten eingefroren. Anschließend werden Fragen gestellt, die sich auf das dargebotene Geschehen beziehen. Diese Fragen werden üblicherweise zuvor in einer Aufgabenanalyse ermittelt [154]. Um den Einfluss des Nachfragens auf die Aufmerksamkeit der Probanden so gering wie möglich zu halten, werden bei jeder Unterbrechung nur einige und zufällig ausgewählte Fragen des Fragenkatalogs gestellt.

Die im Rahmen dieses Versuchs angewandte Methode ähnelt prinzipiell dem SAGAT. Es werden ebenfalls dynamische Szenarien gezeigt und während einer Unterbrechung Fragen gestellt, die Rückschlüsse auf das generierte erweiterte Raumbewusstsein erlauben. Im Unterschied zum SAGAT, bei dem eine Vielzahl verschiedener Fragen zu beantworten sind, werden in diesem Versuch jedoch ausschließlich zylindrische Objektkoordinaten abgefragt. Die Art der Frage ist somit immer dieselbe. Einzig das zu schätzende Objekt und der Schätzzeitpunkt werden variiert. Aus diesem Grund wird die Aufmerksamkeit der Probanden während der Darbietung der Szenarien nur auf die relevanten Objektattribute fokussiert.

Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Methoden besteht in der Regelmäßigkeit, in der die Szenarien unterbrochen werden. Während die Darbietungszeitspanne beim SAGAT zufällig variiert, wird sie in diesem Versuch konstant gehalten, weil das sogenannte Überraschungsmoment, das durch eine zufällige Unterbrechung erzeugt werden soll, im Kontext der Objektpositionsschätzung nicht von Bedeutung ist.

Da die Abfrage von erweitertem Raumbewusstsein durch Schätzungen erfolgt, können die Antworten nicht in „richtig“ oder „falsch“ diskretisiert werden. Stattdessen werden für jede Antwort die Leistungsindikatoren Schätzfehler und die Wiedergabezeit für die einzelnen Koordinatenkomponenten aufgezeichnet.

Als Nachteil der angewandten Methode ist zu erwähnen, dass durch die retrospektive Befragungstechnik auch das Erinnerungsvermögen der Probanden überprüft wird. Das heißt, Situationsbewusstsein wird nicht isoliert gemessen. Dieser Umstand muss bei der Ergebnisauswertung und -interpretation berücksichtigt werden.

4.1.2. Subjektiv erlebtes Raumbewusstsein

Ein Beispiel einer subjektiven Messmethode von Situationsbewusstsein beschreibt die Situation Awareness Rating Technique, kurz SART genannt [154]. Durch die SART-Fragetechnik werden folgende Größen erfasst [152]:

- Anforderungen/Bedarf von Aufmerksamkeitsressourcen (BA)
- Verfügbarkeit an Aufmerksamkeitsressourcen (VA)
- Verständnis der Situation (VS)

Der große Vorteil dieser Evaluationsmethode besteht in ihrer einfachen Durchführung. Nach Beendigung der Simulation werden die subjektiven Bewertungen für die drei gelisteten Bereiche erhoben. Als Grundlage dazu dient eine metrische Skala mit den Werten eins, für eine niedrige Ausprägung, bis sieben, für eine hohe Ausprägung. Ein wesentlicher Nachteil des SART besteht in der Subjektivität der Messung. Wickens hat dies in einem Satz sehr treffend formuliert [156, S.261]: "... people are not aware of those things of which they are not aware". Ein mögliches informatives Defizit ist den Probanden also selbst nicht zwingend bewusst. Das reale Situationsbewusstsein lässt sich durch diese Methodik daher nur bedingt erfassen. Diese Feststellung ist ein wesentlicher Grund, weshalb in zahlreichen Untersuchungen keine Korrelationen zwischen objektiven und subjektiven Messungen von Situationsbewusstsein festgestellt wurden [154].

Dennoch wird der SART als eine sinnvolle Ergänzung zur Messung von erweitertem Raumbewusstsein betrachtet und daher in diese Untersuchung integriert. In Kombination mit einer objektiven Messmethode lässt sich durch ihn feststellen, inwieweit eine Selbstbeurteilung des eigenen Situationsbewusstseins mit der objektiv erfassten Leistung übereinstimmt. Des Weiteren kann das selbst wahrgenommene Situationsbewusstsein Einfluss auf die Handlungsauswahl besitzen [154]. So kann es sein, dass eine Situation zwar korrekt verstanden wurde, die Unsicherheit über dieses Verständnis jedoch groß ist und somit die Entscheidungsfindung hemmt. Die SART Fragetechnik unterstützt die Identifikation solcher Unsicherheiten.

4.1.3. Weitere Erhebungen

Neben der objektiven und subjektiven Messung von Situationsbewusstsein werden weitere Parameter zur Beurteilung der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung durch ausgewählte Fragen des NASA TLX (NASA Task Load Index) [155] erhoben. Diese betreffen folgende Punkte:

- geistige Anforderung (GA)
- körperliche Anforderung (KA)
- zeitliche Anforderung (ZA)
- Erfolg durch Ausführung der Aufgabe (AA)
- Anstrengung (AN)
- Frustration (FR)

Diesen Parametern liegt eine metrische Skala zu Grunde, welche aus ganzzahligen Schritten besteht, bei 1 beginnt und bei 100 endet. Niedrige Werte repräsentieren eine niedrige Parameterausprägung, hohe Werte eine hohe Parameterausprägung.

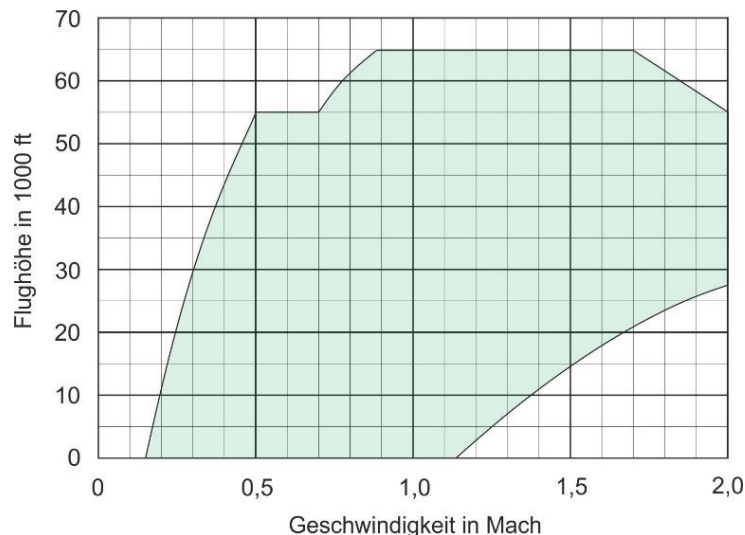
Zusätzlich sind die drei verschiedenen Ansichten in eine Rangfolge zu überführen, die deren Unterstützung bei der durchzuführenden Aufgabe widerspiegelt. Dabei sind den einzelnen Ansichten die Zahlenwerte 1, 2 oder 3 zuzuweisen, wobei jeder Wert nur einmalig vergeben werden darf. Die „1“ repräsentiert die beste Eignung im Vergleich, die „3“ die schlechteste.

4.2. Erstellung der Versuchsszenarien

Die Erstellung der Versuchsszenarien erfolgt automatisiert durch Skripte, die in MATLAB verfasst wurden. Durch diese Vorgehensweise können vergleichbare Szenarien sehr effizient generiert werden. Wie in Kapitel 4.1 erwähnt, werden taktische und strategische Aspekte aus analyseerschwerenden Gründen nicht berücksichtigt. Stattdessen wird ein stark vereinfachtes Flugverhalten abgebildet. Als Flugobjekte werden ausschließlich hochagile Starrflügler angenommen.

Aus den aerodynamischen und strukturmechanischen Eigenschaften des Fluggeräts, der Leistungsfähigkeit des Triebwerks, der Physiologie des Menschen und der Beschaffenheit der umgebenden Atmosphäre ergeben sich grundlegende Begrenzungen im flugdynamischen Verhalten, die sich im Verhalten der simulierten Objekte widerspiegeln müssen. Wichtige Limitierungen betreffen bei Starrflüglern mit luftatmenden Triebwerken beispielsweise die maximale Flughöhe, sowie die höhenabhängige minimale und maximale Fluggeschwindigkeit [156]. Ferner existieren Beschränkungen der Vertikalgeschwindigkeiten, der Flugzeugdrehraten sowie der Flugzeuglasten.

Die Mindestgeschwindigkeit, die Maximalhöhe und die Maximalgeschwindigkeit definieren für jedes Flugzeug eine charakteristische Flugleistungshüllkurve, in deren Bereich ein Flugzeug stationär operieren kann. In Diagr. 4-1 ist die Flugleistungshüllkurve exemplarisch für das Flugzeugmuster Eurofighter dargestellt, deren abgebildete Grenzen als Grundlage bei der Erstellung der Versuchsszenarien dienen.



Diagr. 4-1: Flugleistungshüllkurve Höhe über Machzahl am Beispiel des Eurofighters [157]

Die Positionierung der einzelnen Objekte im dargestellten Raum erfolgt anhand eines gleichverteilten Zufallsalgorithmus. Die maximale horizontale Entfernung zum eigenen Flugzeug ist auf 50 NM begrenzt, die Höhe ist auf einen Mindestwert von 5000 ft und einen Maximalwert von 60 000 ft limitiert. Um die eindeutige Lesbarkeit aller Objekte zu gewähren, halten diese zueinander stets einen horizontalen Mindestabstand von 1 NM oder einen vertikalen Mindestabstand von 500 ft ein.

Die eigene Flughöhe beträgt in allen Szenarien konstant 30 000 ft, die eigene Fluggeschwindigkeit konstant 1020 kn ($Ma \approx 1,5$). Sowohl die eigene Flugbahn als auch die Flugbahnen der anderen Objekte verlaufen horizontal und geradlinig. Die Objektfluggeschwindigkeiten variieren zufällig gleichverteilt zwischen 600 kn ($Ma \approx 0,9$) und 1200 kn ($Ma \approx 1,8$). Wertepaare, die außerhalb der in Diagr. 4-1 dargestellten Grenzen liegen, wurden nicht berücksichtigt.

Die Objektrelativgeschwindigkeit gegenüber dem eigenen Flugzeug kann somit maximal 2220 kn betragen. Die relative Flugrichtung der Objekte wird durch den relativen Kurswinkel beschrieben. Diesem wurden Werte zwischen 0° und 360° durch einen gleichverteilten Zufallsalgorithmus zugewiesen. Final wurde überprüft, ob alle Objekte während der Simulationsdauer von 15 s und der zusätzlichen Vorhersagedauer von 45 s den Abbildungsraum nicht verlassen. War dies doch der Fall, erfolgte eine automatische Korrektur des relativen Kurswinkels des aus dem Wertebereich ausgetretenen Objektes.

4.3. Beschreibung der Raumformate

Um eine fundierte Vergleichsbasis zu schaffen, werden neben dem zu untersuchenden heterozentrischen, perspektivischen Panoramaformat zwei alternative Raumformate implementiert. Mit dem zweidimensionalen, koplanaren Format und dem exozentrischen, gebundenen Format werden dabei zwei Formate gewählt, die bereits Anwendung im Cockpit finden und grundlegend verschiedene Projektionsalgorithmen aufweisen.

Die Größe und Ausrichtung des dargestellten, räumlichen Segmentes ist in allen drei Formaten identisch. Von der eigenen Position ausgehend wird eine maximale horizontale Entfernung von 50 NM dargestellt. Des Weiteren werden Flughöhen zwischen 0 und 60 000 ft abgebildet.

Das Polarkoordinatensystem der Referenzebene ist in dunkelblauer Farbe gehalten. Die Radiale -90° und $+90^\circ$ sind zur visuellen Abgrenzung der vorderen von der hinteren Hemisphäre in allen Ansichten in einer breiteren Linienstärke ausgeführt. Die Auflösung des polaren Gitternetzes beträgt 30° in der azimuthalen Dimension und 10 NM in der Entfernungsdimension. Die Dimension Höhe wird in 10 000 ft Schritten aufgelöst.

Zielobjekte werden in Form roter Rauten dargestellt, Distraktoren in Form gelber Kreise. Sämtliche Objekte werden durch einzelne, sich in der Objektmittle befindende Buchstaben eindeutig gekennzeichnet. Aus Gründen der Kontrastoptimierung ist die Buchstabenfarbe bei Zielobjekten weiß und bei Distraktoren schwarz.

Das eigene Flugobjektsymbol wird, sofern es durch das entsprechende Raumformat abgebildet wird, in grüner Farbe als gleichschenkliges Dreieck dargestellt. Die Ausrichtung der Dreiecksspitze entspricht dabei der eigenen Flugrichtung.

Objektrelativbewegungen in horizontaler Richtung werden durch Geschwindigkeitsvektoren indiziert. Die Geschwindigkeitsrichtung wird durch die Ausrichtung eines Vektors auf der Referenzebene quantitativ visualisiert. Die Visualisierung des Geschwindigkeitsbetrages erfolgt hingegen nur qualitativ. In Kombination mit einem Referenzkreis werden drei diskrete Geschwindigkeitsbereiche dargestellt. Ist der Geschwindigkeitsvektor kürzer als der Radius des Referenzkreises, entspricht dieser einer Relativgeschwindigkeit von weniger als 600 kn. Ist er genauso lang, wird eine Relativgeschwindigkeit zwischen 600 kn und 900 kn repräsentiert, wohingegen ein Geschwindigkeitsvektor, der größer als der Radius des Referenzkreises ist, Relativgeschwindigkeiten von mehr als 900 kn abbildet.

In der vertikalen Dimension wird nur die Richtung der Objektrelativbewegung angezeigt, nicht jedoch der Betrag. Nach oben gerichtete Pfeile symbolisieren Steigindikatoren, nach unten gerichtete Pfeile Sinkindikatoren. Diese werden nur dann dargestellt, wenn ein Objekt mit einem Betrag größer als 100 ft/min steigt oder sinkt.

4.3.1. Zweidimensionales, koplanares Format

Bei dem zweidimensionalen, koplanaren Format werden zwei zweidimensionale Abbildungen nebeneinander dargestellt. Die linke Abbildung beschreibt eine einfache Kartendarstellung basierend auf einer orthografischen Projektion im Hauptriss. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird die Karte stets mit dem Flugzeug und der Flugrichtung mitgeführt. Sie entspricht somit einer track up moving map (Vgl. Kap. 2.5.3.2). Mit dieser Kartendarstellung können relative Azimutwinkel und relative horizontale Entfernungen erfasst werden, nicht jedoch Objekthöhen.

Letztere müssen über eine zusätzliche Abbildung auf der rechten Seite der Ansicht visualisiert werden. Diese basiert bei diesem Versuch ebenfalls auf einer orthografischen Projektion. Um einen Bezug zu der Entfernungskomponente der Zylinderkoordinaten herzustellen, verlaufen die Projektionsstrahlen in der Horizontalebene nicht geradlinig, sondern gekrümmt in Form von Halbkreisen. Es handelt sich folglich um eine nichtlineare orthografische Projektion (Vgl. 2.3.2), bei der die Objekthöhe über der horizontalen Objektentfernung aufgetragen wird. Diese Projektionsart wurde im E-Scope Format für die vordere Hemisphäre bereits umgesetzt. Um den kompletten umgebenden Raum darzustellen, muss dieses Projektionsschema jedoch auch auf die hintere Hemisphäre angewandt werden. Es werden daher auf der linken Seite der zweiten Abbildung die hintere und auf der rechten Seite die vordere Hemisphäre dargestellt. Die eigene Flughöhe wird durch ein grünes, gleichschenkliges Dreieck auf der Ordinatenachse sowie eine in dieser Höhe verlaufende, horizontale, grüne Linie markiert.

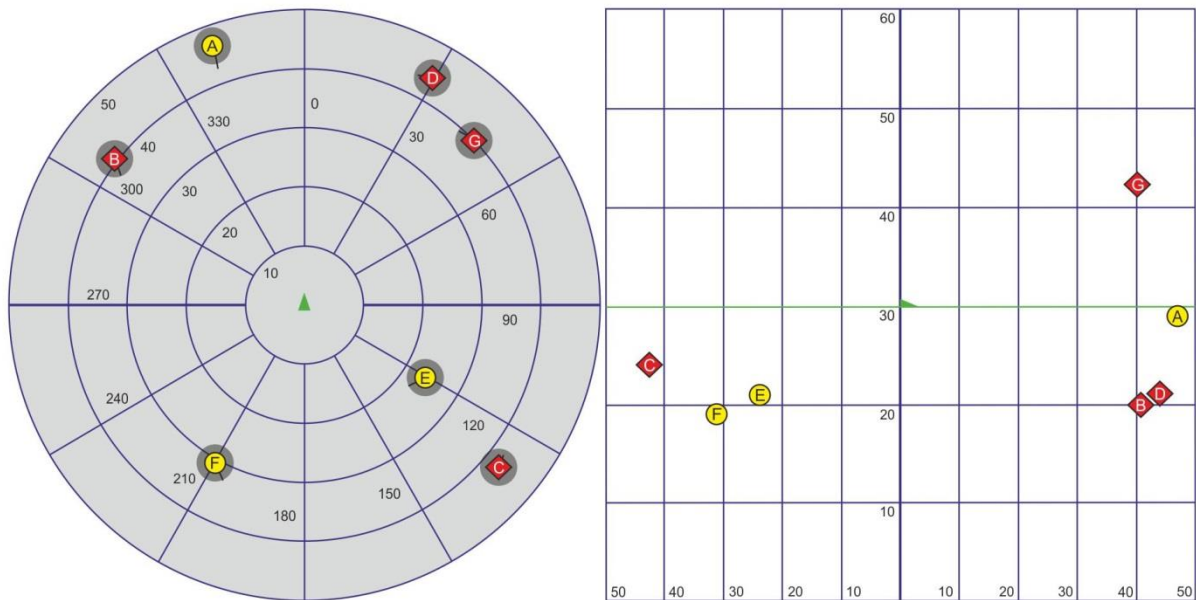


Abb. 4-1: Zweidimensionales, koplanares Format (kontrastoptimierte Abbildung)

4.3.2. Exozentrisches, gebundenes Format

Das exozentrische, gebundene Format basiert auf einer axonometrischen, orthografischen Parallelprojektion. Von der Verwendung einer Zentralprojektion wurde an dieser Stelle abgesehen, da die perspektivische Wirkung, ausgehend von einem beliebigen Raumpunkt, an dem die virtuelle Kamera positioniert ist, bei der Erfassung egozentrischer Maße nicht gewinnbringend ist. Die virtuelle Kamera wird daher im Unendlichen hinter dem eigenen Flugzeug positioniert. Die Neigung der Projektionsstrahlen gegenüber der Horizontalebene wurde auf 40° festgelegt. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss dar, um sowohl das polare Referenzgitter in der Horizontalebene als auch Höhenmarkierungen an den Objektloten ausreichend genau aufzulösen. Ähnlich der track up moving map der zweidimensionalen, koplanaren Ansicht, befindet sich auch bei dieser Ansicht das eigene Flugzeugsymbol stets in der Mitte des dargestellten Raumsegmentes. Es zeigt dabei stets in Richtung des oberen Bildschirmrandes. Das heißt, der Bildausschnitt ist wieder an die eigene Flugzeugbewegung gebunden. Der Grad der Exozentrizität ist durch die Bindung an das eigene Flugverhalten gering.

Die Kodierung von Tiefeninformationen erfolgt durch Objektlotlinien und eine sich auf Meereshöhe befindende Referenzebene. Die Objektlotlinien und die zugehörigen Höhenskalen sind in der jeweiligen Objektfarbe ausgeführt, die Referenzebene in grauer Farbe. Der Lotfußpunkt visualisiert die horizontale Objektposition, die Lotlänge die vertikale Objektposition. Breite Marker der Lotlinienskala indizieren Intervalle von 10 000 ft. Für ein vereinfachtes Ablesen wird im letzten angebrochenen 10 000 ft Intervall zusätzlich ein schmaler Marker bei 5000 ft ergänzt, wenn sich das Objekt oberhalb dieser 5000 ft Markierung befindet. Durch die axonometrische Projektion werden Kreise des polaren Gitternetzes gestaucht und erscheinen als Ellipsen.

Grüne Marker an den Objektloten markieren die eigene Flughöhe. Befindet sich ein Objekt unterhalb der eigenen Flughöhe, wird die Objektlotlinie bis zum Marker der eigenen Flughöhe erweitert. Da der Informationsgehalt der Objektsymbole wichtiger als der der Lotlinienskala ist, werden Objektsymbole auf einem Layer über der Lotlinienskala gezeichnet. Befindet sich ein Höhenmarker in der Nähe eines Objektsymbols, kann dieses daher unter Umständen den Höhenmarker verdecken.

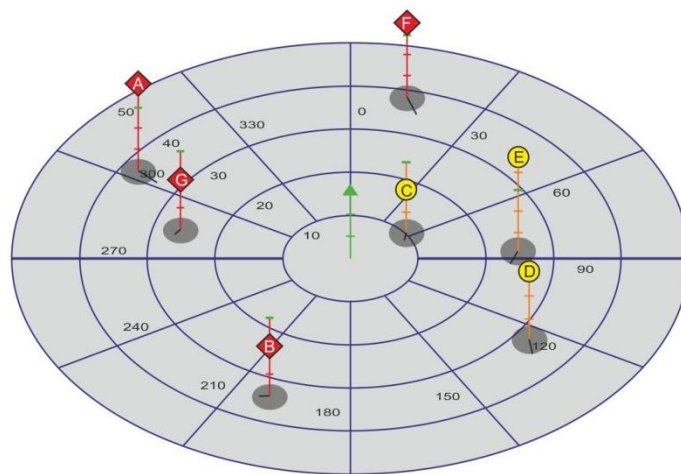


Abb. 4-2: Exozentrisches, gebundenes Format (kontrastoptimierte Abbildung)

4.3.3. Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat

Das heterozentrische, perspektivische Panoramaformat fußt auf einer sphärischen Zentralprojektion. Es besitzt daher einen perspektivischen Charakter. Zusätzliche Tiefenschlüssel, wie zum Beispiel die entfernungsabhängige Skalierung der Objektgröße, verstärken den perspektivischen Eindruck. Die Projektionsfläche beschreibt eine sphärische Form. Um auch weit entfernte Objekte mit einer hinreichenden Genauigkeit erfassen zu können, wird das vertikale geometrische Blickfeld auf eine Größe von 90° beschränkt. Durch das horizontale geometrische Blickfeld von 360° und dem Displayseitenverhältnis von 2:1 ist die Abbildung ungleich skaliert: Elevationswinkel werden doppelt so hoch aufgelöst wie Azimutwinkel. Des Weiteren werden Bereiche außerhalb des Elevationswinkelintervalls von -45° bis $+45^\circ$ nicht dargestellt. Bei der gewählten eigenen Flughöhe von 30 000 ft beträgt die untere Grenze des dargestellten Entfernungsbandes somit 4,9 NM. Objekte die eine geringere Entfernung als diese 4,9 NM aufweisen, können in ihrer Position über den Lotfußpunkt nicht mehr eindeutig referenziert werden.

Die Kodierung von Tiefeninformationen erfolgt, analog der exozentrischen, gebundenen Ansicht, durch Objektlotlinien und eine sich auf Meereshöhe befindende Referenzebene. Die Objektlotlinien und die zugehörigen Höhenskalen sind wieder in der jeweiligen Objektfarbe ausgeführt, die Referenzebene in grauer Farbe. Der Lotfußpunkt indiziert die horizontale Objektposition, die Lotlänge die vertikale. Breite Marker der Lotlinienskala indizieren Intervalle von 10 000 ft. Für ein vereinfachtes Ablesen wird im letzten angebrochenen 10 000 ft Intervall zusätzlich ein schmaler Marker bei 5000 ft ergänzt, wenn sich das Objekt oberhalb dieser 5000 ft Markierung befindet.

Das polare Gitternetz der Referenzebene wird, wie in Kapitel 3.2.3 und 3.4.1 beschrieben, verzerrt dargestellt. Die Auflösung von Längenskalen ist nicht konstant. Sie nimmt, wie bei perspektivischen Projektionen üblich, mit zunehmender Entfernung vom Projektionszentrum ab. Dies betrifft sowohl die Visualisierung der Objektentfernung als auch die Visualisierung der Objekthöhe.

Die eigene Flughöhe wird durch eine horizontal verlaufende, grüne Linie indiziert. Da der Informationsgehalt der Objektsymbole wieder wichtiger als der der Lotlinienskala ist, werden Objektsymbole auf einem Layer über der Lotlinienskala gezeichnet. Befindet sich ein Höhenmarker in der Nähe eines Objektsymbols, kann dieses daher unter Umständen den Höhenmarker verdecken.

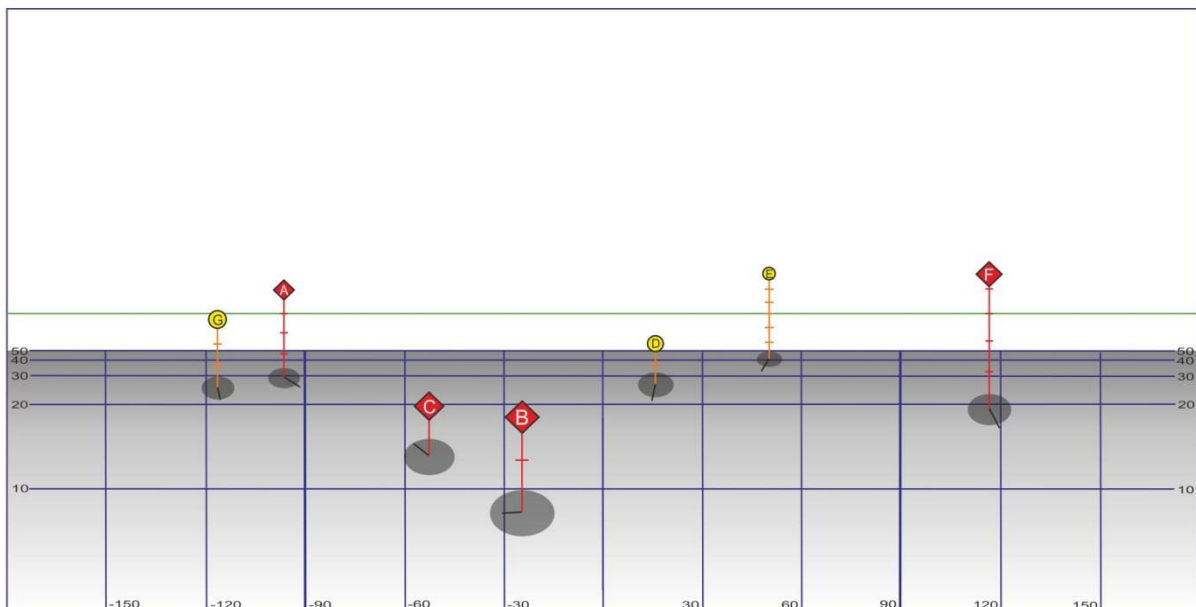


Abb. 4-3: Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat (kontrastoptimierte Abbildung)

4.4. Datenerhebung

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wird die Leistung durch den Schätzfehler und die Schätzzeit operationalisiert. Der Schätzfehler entspricht der normierten Differenz zwischen tatsächlicher und geschätzter Position. Die Angabe der Schätzwerte erfolgt für die drei Raumdimensionen Entfernung, Azimutwinkel und Höhe getrennt. Die einzelnen Komponenten sind von den teilnehmenden Probanden in grafische Antwortmasken der Versuchssoftware einzutragen (siehe Abb. 4-4). Die Abfrage numerischer Zahlenwerte durch die Wiedergabe von Ziffern wird an dieser Stelle bewusst vermieden. Numerische Zahlenwerte sind abstrakt und spiegeln das Bewusstsein über die reale Position eines Objektes nur bedingt wider. Es werden stattdessen grafische Skalen bevorzugt. Auf diese Weise bleibt der Raumgrößenbezug der einzelnen Parameter erhalten. Längenmaße, wie die Entfernung und die Höhe des Objektes, sind in geradlinige Linearskalen einzutragen, wohingegen der Azimutwinkel mit Hilfe einer zyklischen Skala anzugeben ist. Der Wertebereich der Längenskala orientiert sich an dem Wertebereich des in der Simulation dargestellten Raumes. Die Normierung der Schätzfehler erfolgt mit dem in der jeweiligen Raumdimension maximal möglichen Schätzfehler. Dieser beträgt für den Azimutwinkel 180° , für die Entfernung 50 NM und für die Höhe 60 000 ft.

Zusätzlich wird die Zeit für die einzelnen Raumdimensionen gemessen, die zwischen Darbietung der Antwortmaske und getätigter Eingabe verstreicht.

Die Datenerhebung des NASA TLX, des SART sowie das Bilden der Rangfolge des präferierten Raumformats erfolgt in Form von Fragebögen.

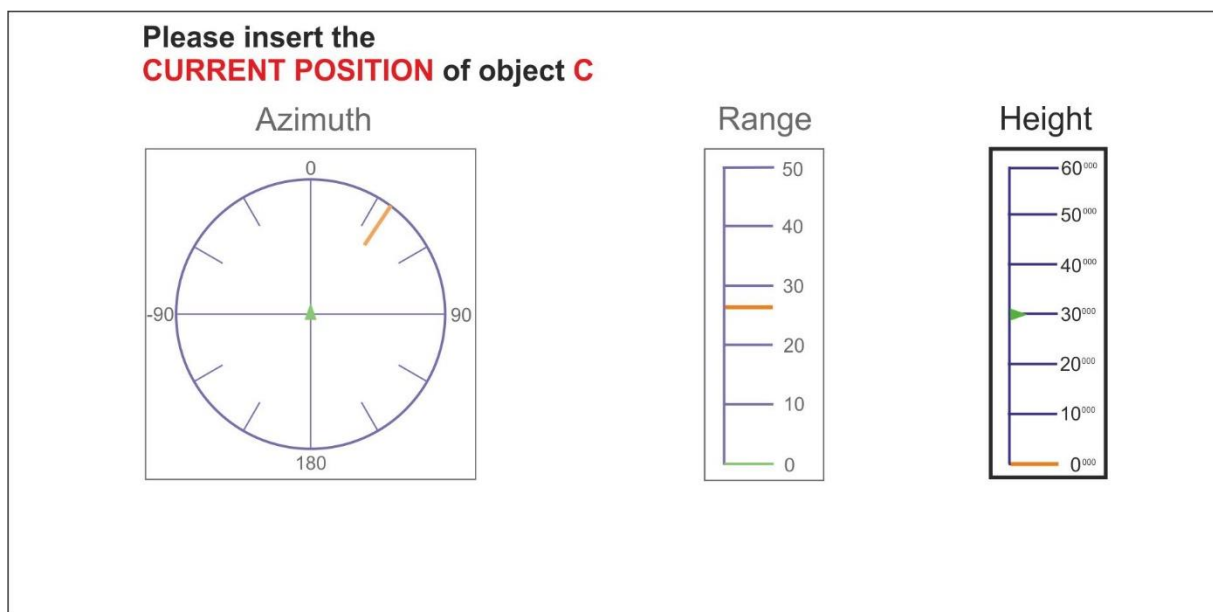


Abb. 4-4: Antwortmaske: Höhenskala aktiv (kontrastoptimierte Abbildung)

4.5. Versuchsplan

Um die in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen des ersten Hauptversuchs in einem einzigen Experiment zu prüfen, bedarf es eines mehrfaktoriellen Versuchsplans. Für diesen werden neben dem Raumformat zusätzlich die Schwierigkeit der Aufgabe und der Fragentyp als unabhängige Variablen gewählt. Er besitzt somit insgesamt drei Faktorstufen.

Das dargebotene Raumformat kann drei verschiedene Ausprägungen besitzen: es ist entweder koplanar und zweidimensional, exozentrisch und gebunden, oder heterozentrisch und panoramaartig (Kapitel 4.3).

Der Schwierigkeitsgrad wird durch eine unterschiedliche Anzahl an zu beobachtenden Objekten variiert. Zwei dargebotene Zielobjekte repräsentieren eine niedrige Schwierigkeit, vier Zielobjekte eine mittlere und sechs Zielobjekte eine hohe Schwierigkeit. Zusätzlich zu den Zielobjekten werden stets auch drei Distraktoren dargestellt. Distraktoren repräsentieren unwichtige Objekte, die sich visuell von Zielobjekten abgrenzen. Ihre Aufgabe besteht darin, Ablenkung zu erzeugen, um somit kontextkonforme Versuchsrahmenbedingungen zu schaffen. Für jedes Szenario werden daher je nach Schwierigkeitsgrad fünf, sieben oder neun Objekte dargestellt.

Der Fragentyp wird zur Unterscheidung zwischen der Verständnis- und der Antizipationsebene von Situationsbewusstsein variiert. Es wird entweder nach der aktuellen Objektposition zum Zeitpunkt des Simulationsabbruchs gefragt oder nach der geschätzten Position, an der sich das Objekt in 45 s nach Simulationsabbruch befinden wird. Daraus ergeben sich insgesamt 18 verschiedene Faktorstufenkombinationen, die im Rahmen dieses Versuchs untersucht werden. Jeder Faktorstufenkombination werden insgesamt zehn verschiedene Szenarien zugeordnet, woraus sich pro Versuchsperson für die Leistungsmessung insgesamt 180 Messpunkte ergeben. Bewertungen bezüglich des NASA TLX und des SART werden für jede Faktorstufenkombination nur einmal erfasst, das Bilden der subjektiven Rangfolge erfolgt einmalig zum Abschluss des gesamten Versuchs.

Der Faktor Raumformat wird blockweise untersucht. Die Blocksequenzen werden für verschiedene Probanden zufällig permutiert. Effekte, die aus der Sequenznummer resultieren, wie beispielsweise die zunehmende Müdigkeit der Probanden mit fortschreitender Versuchsdauer oder auch Training, werden so über die gesamte Stichprobe ausgeglichen.

Auf eine ähnliche Art wird mit dem Faktor Schwierigkeit der Aufgabe, also der dargestellten Zielobjektanzahl, verfahren. Dieser Faktor wird innerhalb des Faktors Raumformat ebenfalls blockweise variiert, wobei die Sequenzen der einzelnen Subblöcke wieder probandenabhängig permutiert werden.

Innerhalb dieser Subblöcke wird schließlich der letzte Faktor, die Art der Frage, variiert. Im Gegensatz zu den anderen Faktoren, die nur blockweise geändert werden, variiert die Art der Frage zufällig mit jeder einzelnen Aufgabe.

Tab. 4-1: Versuchsplan 1. Versuch

Faktor 1: Raumformat (Block)	2D						EXO						PAN					
Faktor 2: Objektanzahl (Subblock)	2		4		6		2		4		6		2		4		6	
Faktor 3: Art der Frage	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk	Akt	Zuk
Anzahl der Messpunkte	20		20		20		20		20		20		20		20		20	

2D - zweidimensionale, koplanare Ansicht

EXO - exozentrische, gebundene Ansicht

PAN - heterozentrische Panoramaansicht

Akt - Frage nach der aktuellen Position

Zuk - Frage nach der zukünftigen Position

4.6. Versuchsumgebung

Als Räumlichkeit zur Durchführung des Versuchs dient das klimatisierte und abdunkelbare Human Factors Engineering Labor von Airbus Defence and Space am Standort Manching. Dieses bietet hinsichtlich der Vermeidung visueller, auditiver und haptischer Störeffekte optimale Versuchsbedingungen. Als Träger des Großflächendisplays dient ein Cockpit Mock-Up aus Holz und Kunststoff. Die darin integrierten Befestigungsvorrichtungen ermöglichen eine variable Ausrichtung und Positionierung des Displays. Durch die Verstellungsmöglichkeiten des Mock-Up Sitzes kann exakt die Sitzposition eingestellt werden, bei der sich der Augpunkt der Probanden im Design Eye Point (DEP) befindet (Kap. 3.1.2). Des Weiteren ist eine Ablagefläche für die Füße vorhanden, deren Form und Positionierung der Pedale im Cockpit nachempfunden ist. Auf diese Weise wird eine einem realen Cockpit sehr ähnliche Versuchsumgebung sichergestellt.



Abb. 4-5: Mock-Up zur Durchführung der Versuche [eigene Bildquelle]

4.6.1. Versuchshardware

Das Großflächendisplay wird durch ein 30 Zoll großes Flüssigkristalldisplay von Dell bereitgestellt. Es ist 640 mm breit und 400 mm hoch. Die Auflösung beträgt 2560 mal 1600 Pixel. Es ergibt sich somit ein Seitenverhältnis 8:5 und eine Auflösung von 100 dpi. Bezogen auf die minimale Entfernung zum DEP von 633 mm (Abb. 3-3) ergibt sich eine Winkelauflösung, welche im Bereich des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges liegt (Kap. 2.4.2). Da das Panoramaformat auf einer rechteckigen Displayfläche mit dem Seitenverhältnis von 2:1 dargestellt werden soll (Kap. 3.2.4) und die im Cockpit verfügbare Displayhöhe maximal 230 mm beträgt (Kap. 3.1.2), wird die Höhe der Raumformate auf diesen Wert beschränkt und deren Breite auf 460 mm festgesetzt.

Als Medium zur Eingabe der Antworten in die grafischen Antwortmasken dient ein Touchscreen der Baureihe SlimLine L-Series (Firma IR Touch). Dieser basiert auf Infrarot Technologie und entspricht daher demselben technischen Wirkungsprinzip, wie der von Kellerer [124] untersuchte und für Anwendungen im Cockpit vorgeschlagene Touchscreen. Das Lift-Off Aktivierungsprinzip ermöglicht dabei den Probanden Korrekturen der Eingaben vorzunehmen, solange ihr Finger den Bildschirm berührt, da Aktionen erst beim Verlassen der Bildschirmoberfläche getriggert werden.

Die Fragebögen zur Erhebung der subjektiven Daten liegen hingegen in Papierform vor und sind mit Kugelschreiber auszufüllen. Der Versuchsrechner zur Wiedergabe der notwendigen Anwendungen ist ein Terra PC mit vier Intel i7 Prozessoren und 16 GB Arbeitsspeicher. Das operierende Betriebssystem ist Windows XP.

4.6.2. Versuchssoftware und Datentypen

Die Anwendung zur Versuchsdurchführung wird mit VAPS XT 3.1.2 [158] erstellt. VAPS XT ist eine Software des kanadischen Unternehmens PRESAGIS, die das Erstellen grafischer Benutzeroberfläche für die Luftfahrt oder anderer Industriebereiche ermöglicht. Das Funktionsprinzip basiert auf Klassen und Implementierungen und ähnelt daher der objektorientierten Programmierung. Mit Hilfe einer sogenannten IDE (integrated development environment) kann der Anwender Klassen und Implementierungen erstellen und bearbeiten. Auf diese Weise können grafische Objekte und einfache mathematische oder logische Operationen umgesetzt werden. Da der dabei abgedeckte Funktionsumfang begrenzt ist, besteht die Möglichkeit mit Hilfe sogenannter programmierter Implementierungen eigene Objekte in der Entwicklungsumgebung C++ zu erstellen [158]. Solche programmierten Implementierungen kommen bei der Entwicklung der Versuchsumgebung insbesondere zur Umsetzung von Projektionsalgorithmen, Koordinatentransformationen, Positionsberechnungen und der Aufnahme und Speicherung der Probandenantworten zur Anwendung.

Durch einen Codegenerator, der im verwendeten VAPS XT Developer Paket enthalten ist, wird aus dem VAPS-XT Projekt abschließend eine ausführbare Datei (.exe) generiert. Diese kann unabhängig von der installierten Entwicklungsumgebung auf beliebigen windowsbasierten Rechnern ausgeführt werden. Programmierte Implementierungen werden dabei als statische Bibliotheken in die ausführbare Datei eingebunden. Die auf diese Weise erzeugte Programmdatei bildet das Grundgerüst bei der Versuchsdurchführung (Abb. 4-6). Sie deckt Funktionen wie:

- Einlesen der Konfigurationsdatei und Szenariendateien
- Ablaufsteuerung und Programmlogik
- Simulation der Objektdynamik
- Transformation von Objektkoordinaten
- Projektion der Objektkoordinaten
- Visualisierung der Raumformate und Antwortmasken
- Erfassung und Verarbeitung der Eingabedaten
- Speicherung der Eingabedaten

ab.

Die Kommunikation mit der Programmdatei erfolgt bei einfachen Benutzereingaben, wie dem Starten oder Fortsetzen des Versuchs, über eine grafische Benutzerschnittstelle (GUI). Komplexere Eingaben werden über txt-Dateien getätigt, die unter Verwendung eines Parsers eingelesen werden. Dies betrifft zum einen die in MATLAB generierten Szenariendateien, die zunächst als Matfiles vorliegen und in txt-Dateien konvertiert werden müssen. Sie enthalten Informationen über die Szenarionummer, die Simulationsdauer, die Anzahl der dargestellten Objekte und Distraktoren sowie deren Raumzustandsgrößen zum Zeitpunkt 0. Zum anderen betrifft dies die Konfigurationsdatei, die für jeden Probanden vor dem Versuchsdurchlauf angepasst werden muss. Sie beinhaltet die Reihenfolge, in der die einzelnen Szenarien während des Versuchs wiedergegeben werden, das Raumformat, mit dem sie zu visualisieren sind, Informationen über den Fragentyp und einen Identifier des teilnehmenden Probanden.

Die aufgezeichneten Leistungsdaten werden für jede Faktorstufenkombination in txt-Dateien gespeichert. Diese beinhalten neben den Wiedergabebefehlern (geschätzte und tatsächliche Positionen) und der zugehörigen Wiedergabezeiten auch wichtige Szenarien- und Konfigurationsparameter. Sämtliche Protokolldateien werden mit Hilfe eines MATLAB-Skriptes im Rahmen einer Vorverarbeitung automatisiert eingelesen, zusammengefasst und letztlich in eine große csv-Datei für die statistische Analyse konvertiert. Zusätzlich werden die manuell digitalisierten Ergebnisse der Fragebögen in die csv-Datei kopiert. Auf dieser Datei basierend erfolgt abschließend die statistische Analyse unter Verwendung der Statistik und Analyse-Software SPSS.

Der Zusammenhang zwischen den beschriebenen Prozessen ist in Abb. 4-6 in Form eines Informationsflussdiagramms für die drei Phasen Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung visualisiert. Grüne Kästchen repräsentieren Hardwarekomponenten, gelbe Kästchen Softwarefunktionalitäten und weiße Kästchen Dateien. Die Darstellung des gerichteten Informationsflusses zwischen verschiedenen Kästchen erfolgt durch Pfeile.

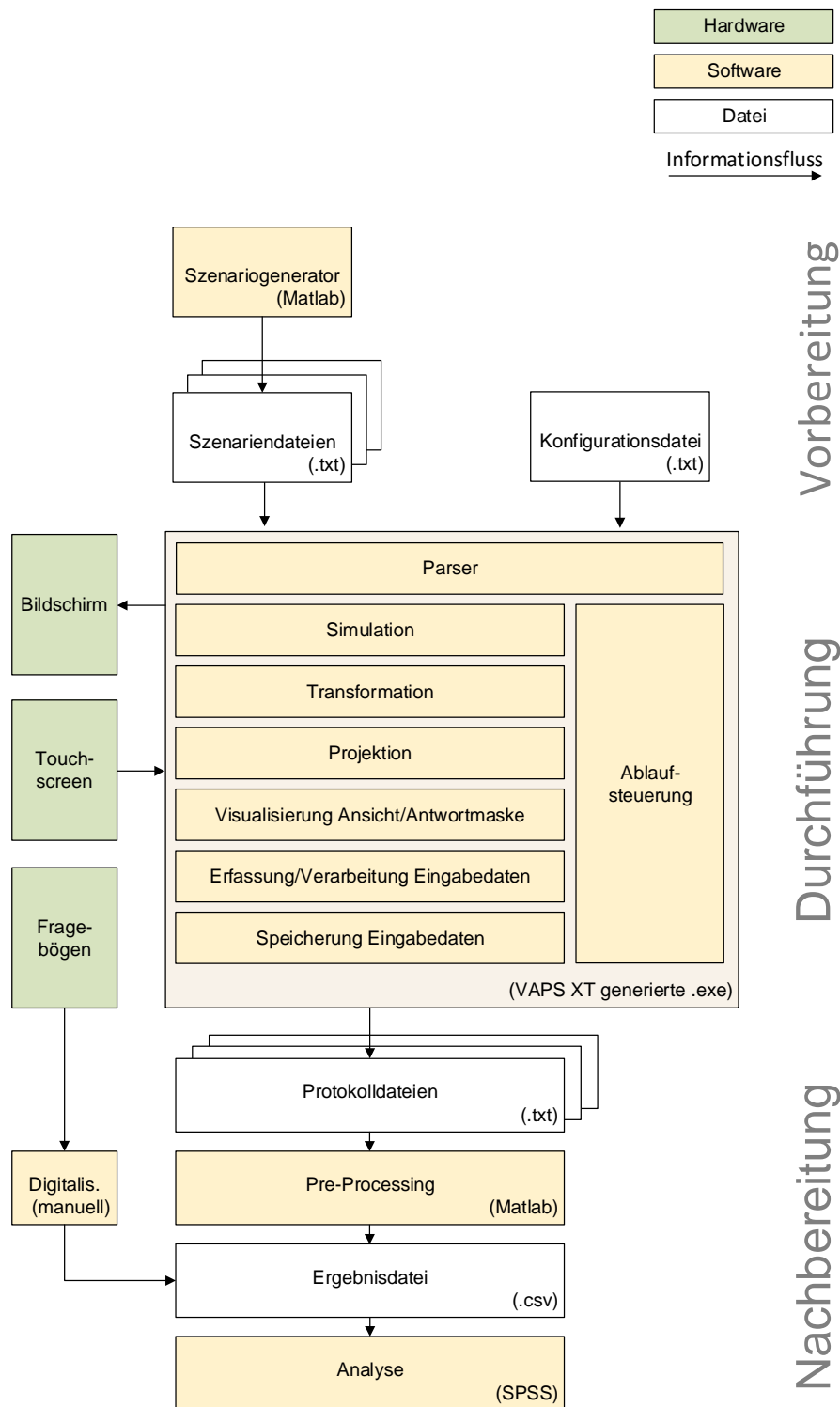


Abb. 4-6: Informationsflussdiagramm der Versuchssoftware

4.7. Versuchsablauf

Der Versuch wird entsprechend der Ausprägungen des Hauptfaktors Raumformat in drei Blöcke unterteilt. Diese bestehen wiederum aus jeweils drei einzelnen Subblöcken. Ein Subblock einer Faktorstufe besteht aus einer Szenariensequenz mit insgesamt 20 Szenarien, wobei jedes Szenario genau einer Aufgabe entspricht (Kap. 4.5). Um während des Versuchs eine mentale Regeneration der Probanden zu ermöglichen, werden zwischen den Blöcken mehrminütige Pausen eingehalten.

Vor dem Start eines Blockes erhalten die Probanden die Möglichkeit für ein ausführliches Training der Aufgabe mit dem jeweiligen Raumformat. Über die Qualität ihrer Antwort werden sie dabei in Form eines unmittelbaren visuellen Feedbacks informiert. Durch dieses Training wird sichergestellt, dass ein Großteil der Lerneffekte, die beim Eingewöhnen in die Darstellungsart auftreten, dem eigentlichen Versuch vorgelagert werden.

Die sequentielle Abfolge einer einzelnen Aufgabe ist in Abb. 4-7 zu sehen. Diese beginnt mit einem statischen, weißen Bild, das für die Dauer von 0,5 s eingeblendet wird. Auf diesem Bild ist mittig ein schwarzes Kreuz abgebildet, welches die Aufgabe hat, den Blick und somit die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen vor jedem Durchlauf auf den Bildschirm zu lenken. Anschließend wird für eine Zeitspanne von 15 s das zu beobachtende Szenario eingespielt. Um einen sprunghaften Übergang zwischen Beobachtungs- und Wiedergabetätigkeit zu vermeiden, wird nach Ausblendung des Szenarios für die Dauer von 0,5 s wieder ein schwarzes Kreuz auf weißem Hintergrund eingeblendet.

Danach erscheint die Antwortmaske auf dem Display. Diese beinhaltet sowohl Informationen über den Identifier des Objektes, dessen Position zu schätzen ist, als auch über den Fragentyp. Die Versuchsperson erfährt also erst jetzt, welche Objektposition zum aktuellen oder zukünftigen Zeitpunkt anzugeben ist. Dadurch wird sichergestellt, dass während der Simulation sämtliche Objekte und deren Parameter von den Probanden beobachtet werden.

Wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, erfolgt die Positionswiedergabe für die drei Raumdimensionen getrennt unter Verwendung grafischer Skalen. Diese werden stets in der Reihenfolge Azimut, Entfernung, Höhe eingeblendet. Die Eingabe der geschätzten Werte innerhalb der Skalen erfolgt durch den Touchscreen. Aufgrund des Lift-Off Aktivierungsprinzip des Touchscreens, besteht die Möglichkeit, die Eingabe zu korrigieren, solange der Finger auf dem Bildschirm verweilt. Sobald er den Bildschirm verlässt, ist eine Korrektur der Eingabe nicht mehr möglich, da jetzt die Skala der nächsten Raumdimension freigeschaltet ist. Die Zeit zwischen dem Erscheinen der einzelnen Skalen und der getätigten Eingaben wird als Schätzzeit erfasst.

Inmitten den Szenariensequenzen, jeweils nach fünf beantworteten Fragen bezüglich der aktuellen und jeweils nach fünf beantworteten Fragen bezüglich der zukünftigen Position, werden den Probanden der SART und der NASA TLX Fragebogen gereicht. Der Fragebogen zur Bildung einer bevorzugten Rangfolge der Raumformate ist hingegen einmalig nach Beendigung des vollständigen Versuchsdurchlaufs auszufüllen.

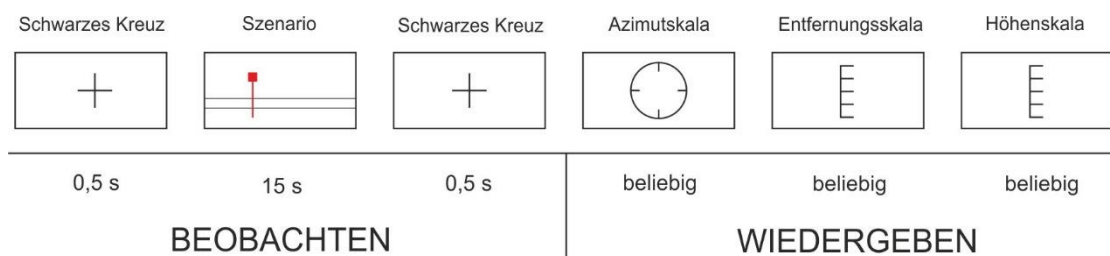


Abb. 4-7: Versuchsablaufplan

4.8. Auswahl der Versuchsteilnehmer

Im Sinne der Erhebung repräsentativer und objektiver Versuchsergebnisse müssen bei der Auswahl der Versuchsteilnehmer zwei grundlegende Aspekte beachtet werden.

Zum einen muss die aus den Versuchsteilnehmern gebildete Stichprobe eine Teilmenge der Grundgesamtheit sein [159]. Für die geplante Untersuchung entspricht die Grundgesamtheit der Anwenderzielgruppe der neuartigen Darstellung, also dem Piloten eines Flugzeuges. Piloten müssen bei ihren Eignungstests hinsichtlich physiologischer und psychischer Kriterien sehr strikte Anforderungen erfüllen. Bezüglich dieser Kriterien ist daher von einem überdurchschnittlichen Leistungsvermögen der Grundgesamtheit auszugehen, das sich auch in der Stichprobe widerspiegeln muss.

Zum anderen sollten die Versuchsteilnehmer auf keine der untersuchten Raumdarstellungen trainiert sein. Ein erhöhtes Trainingsniveau für ein bestimmtes Raumformat kann sowohl voreingenommene, subjektive Präferenzen als auch bessere objektive Leistungen in dieser Darstellungsart zur Folge haben.

Da die zweidimensionale, koplanare Darstellung in vielen Flugzeugmustern bereits Anwendung findet, bestünde die optimale Stichprobe eigentlich aus jungen, unbefangenen Piloten, die ihre Eignungstests erfolgreich bestanden haben und am Beginn ihrer Ausbildung stehen. In der Praxis lässt sich dieser Ansatz aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit dieser Zielgruppe jedoch nicht verfolgen.

Es wurde somit auch auf Testpersonen zurückgegriffen, die über eine mehrjährige fliegerische Erfahrung verfügen. Die Probandenakquise erfolgte firmenintern durch aktive Airbus Defence and Space Testpiloten und durch Angestellte, die ihre fliegerische Karriere bereits beendet haben. Des Weiteren wurden aktive Piloten der Wehrtechnischen Dienststelle WTD 61 in Manching, sowie des Jagdgeschwaders 74 in Neuburg für diesen Versuch eingeladen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Eignungskriterien von Piloten und Waffensystemoffizieren wurden beide Mitglieder der Cockpitcrew für den Versuch zugelassen.

4.9. Durchführung

Zu Beginn des Versuchs erhielt jeder Proband Instruktionen über den geplanten Ablauf. Die drei verschiedenen Raumformate, die zu bearbeitende Aufgabe, die Eingabemasken für die Positionsschätzung und die auszufüllenden Fragebögen wurden detailliert erläutert. Dabei aufkommende Fragen wurden beantwortet. Alle teilnehmenden Versuchspersonen wurden zudem über die Freiwilligkeit der Teilnahme und die Möglichkeit, den Versuch jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen zu können, belehrt. Zusätzlich wurden die Probanden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, in dem personenbezogene Daten, wie Alter, absolvierte Flugstunden und geflogene Flugzeugmuster anzugeben waren.

In den Pausen wurden Getränke und Snacks gereicht. Des Weiteren wurde die Zeit zwischen den Versuchsblöcken für den Dialog mit den Probanden genutzt. Es lässt sich festhalten, dass alle Piloten und WSOs an dem Versuch sehr interessiert teilnahmen und wertvolle Anmerkungen und Hinweise über die Darstellungsarten und die Versuchsgestaltung gaben.

Der Versuch dauerte pro Person zwischen 3,5 und 4 Stunden. Keiner der Probanden hat den Versuch vor Beendigung aller drei Einheiten abgebrochen.

5. Versuch 1: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung und Interpretation der in der ersten Untersuchung erhobenen Messdaten. Nach einer Beschreibung der Stichprobe wird die Vorgehensweise zur statistischen Datenanalyse erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt, interpretiert und diskutiert. Darauf basierend werden letztlich die in Kap 3.5 beschriebenen Hypothesen überprüft.

5.1. Beschreibung der Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt zwölf männliche Probanden teil, deren Altersspektrum sich von 35 bis 56 Jahren erstreckte. Das mittlere Alter betrug 44,3 Jahre ($SD = 5,3$ Jahre), die durchschnittliche Fluggerfahrung 2618 h ($SD = 982$). 9 der 12 Probanden waren Piloten, die verbleibenden 3 Probanden waren Waffensystemoffiziere. Als geflogene Flugzeugmuster wurden der Tornado PA200, die Phantom F4, der Starfighter F104, der Eurofighter EF2000 und die Transall C160 genannt.

5.2. Datenanalyse

Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, wird erweitertes Raumbewusstsein durch den Wiedergabefehler und die Wiedergabezeit der Positionsschätzung operationalisiert. Die Erfassung der Messwerte erfolgt dabei für die drei Raumdimensionen jeweils komponentenweise. Während die Vergleichbarkeit der Wiedergabezeiten zwischen verschiedenen Koordinatenkomponenten aufgrund der identischen Einheit gewährleistet ist, bedarf es bei den Messwerten der Wiedergabefehler einer Normierung. Die Normierung erfolgt für die Längenmaße Objektdistanz und Objekthöhe durch die Maximalwerte der in den grafischen Antwortmasken dargestellten Skalen, weil diese den maximal möglichen Abweichungen der Schätzung entsprechen. Die geschätzte Objektdistanz wird daher mit 50 NM, die geschätzte Objekthöhe mit 60 000 ft normiert.

Aufgrund des zyklischen Charakters von Winkelmaßen entspricht die maximal mögliche Abweichung nur der Hälfte des durch die Skala der grafischen Antwortmaske dargestellten Wertebereiches. Wird einem Objekt zum Beispiel ein geschätzter Azimutwert von 10° zugewiesen, obwohl der reale Objektazimutwert 350° beträgt, so ergibt sich ein Fehler von 20° anstatt 340° . Die Normierung der Azimutdimension erfolgt daher mit 180° .

Die unterschiedlichen Eigenschaften von linearen und zirkularen Skalen führen dazu, dass ein Vergleich zwischen Messwerten der drei untersuchten Raumdimensionen nur bedingt möglich ist. Betrachtet man beispielsweise den Fall, dass eine Objektposition von den Probanden geraten werden muss, so kann bei der Wahl eines mittleren Wertes auf einer Längenskala der maximale Schätzfehler auf die Hälfte des maximal möglichen Schätzfehlers reduziert werden. Bei der zyklischen Skala ist diese Strategie jedoch nicht zielführend, da der maximal mögliche Fehler von 180° theoretisch bei beliebigen Winkelwerten auftreten kann.

Zur Überprüfung der in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen müssen die ermittelten Kenngrößen nun hinsichtlich bedeutsamer Unterschiede zwischen einzelnen Ausprägungen eines Faktors oder einer Faktorstufenkombination analysiert werden. Ein signifikanter Unterschied wird immer dann als gegeben erachtet, wenn die ermittelte Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 % ist [159].

Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede wird der arithmetische Mittelwert der zu untersuchenden abhängigen Variable genutzt und die Varianz um diesen untersucht. Die Mittelung erfolgt innerhalb der interessierenden Faktorstufe oder Faktorstufenkombination über alle Versuchspersonen. Zur Durchführung der Analyse wird auf Post-Hoc Vergleiche zurückgegriffen. Aufgrund der stets gerichtet formulierten Hypothesen kommen im Konkreten einseitige T-Tests zur Anwendung. Diese ermöglichen einen paarweisen Vergleich zwischen zwei Merkmalsausprägungen und geben Auskunft über Signifikanz, Richtung und Größe eines möglichen Unterschiedes.

Sobald dabei mehr als zwei Einzelvergleiche innerhalb einer Faktorstufe durchgeführt werden, tritt die Problematik der sogenannten Alphafehlerkumulierung auf [159]. Betrachtet man beispielsweise zwei solche Einzelvergleiche, für die jeweils eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 4 % ermittelt wurde, innerhalb einer einzigen Hypothese, so beträgt deren gemeinsame Irrtumswahrscheinlichkeit bereits 7,84 %. Während beide Einzelvergleiche für sich betrachtet jeweils signifikant werden, da ihre Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 % ist, ist dies bei einer ganzheitlichen Betrachtung nicht mehr der Fall. Diesem Effekt wird mit der Holm-Bonferroni Korrektur begegnet, indem die Irrtumswahrscheinlichkeit der Einzelvergleiche bereits entsprechend der Anzahl der Einzelvergleiche korrigiert wird. Da die Holm-Bonferroni-Korrektur einen konservativen Ansatz beschreibt, ist die Anzahl der Einzelvergleiche auf die zur Hypothesenprüfung relevanten zu beschränken.

5.3. Versuchsergebnisse

Neben dem Mittelwert einzelner Messpunkte werden die Versuchsergebnisse durch weitere statistische Kenngrößen beschrieben. Diese umfassen zum einen den Standardfehler, welcher die Streuung der Mittelwerte beschreibt. Mittelwerte und Standardfehler werden im Folgenden in Balkendiagrammen visualisiert. Ihre zugehörigen exakten numerischen Werte sind im Anhang D – Ergebnistabellen in tabellarischer Form abgebildet. Das Bilden von Mittelwerten der subjektiven SART und NASA TLX Ratings ist nach Bortz [159] zulässig, da sich die Bewertungen als normalverteilt erwiesen haben.

Unterhalb der Balkendiagramme werden für Paarvergleiche, bei denen der T-Test einen signifikanten Unterschied ergibt, relevante Prüfgrößen dieser statistischen Methode aufgeführt. Diese umfassen die Teststatistik T, die Irrtumswahrscheinlichkeit p, bzw. $p_{\text{adjustiert}}$ und die Effektstärke Cohen's d. Die Irrtumswahrscheinlichkeit $p_{\text{adjustiert}}$ gibt die nach Holm-Bonferroni korrigierte Irrtumswahrscheinlichkeit an, mit der die Nullhypothese verworfen wird, obwohl sie wahr ist. Die Adjustierung erfolgte immer dann, wenn innerhalb einer Faktorstufe mindestens zwei Paarvergleiche für sich betrachtet einen signifikanten Unterschied ergaben.

Der Betrag der Effektgröße Cohen's d beschreibt für Werte um 0,2 einen kleinen (-), für Werte um 0,5 einen mittelgroßen (o) und für Werte um 0,8 einen großen (+) Effekt. Bei einer kleinen Stichprobe weisen Paarvergleiche mit signifikanten Unterschieden tendenziell große Effektgrößen auf [160].

5.3.1. Datenmenge und Datenintegrität

Die Menge der theoretisch erfassbaren objektiven Leistungsdaten lässt sich bei 180 Messpunkten pro vollständigen Versuchsdurchlauf und 12 teilnehmenden Probanden auf insgesamt 2160 Datenpunkte für jede abhängige Variable festschreiben. 33 Datenpunkte konnten jedoch aufgrund eines softwaretechnischen Problems zur Auswertung nicht herangezogen werden. Die Datenintegrität beträgt somit 98,5 Prozent.

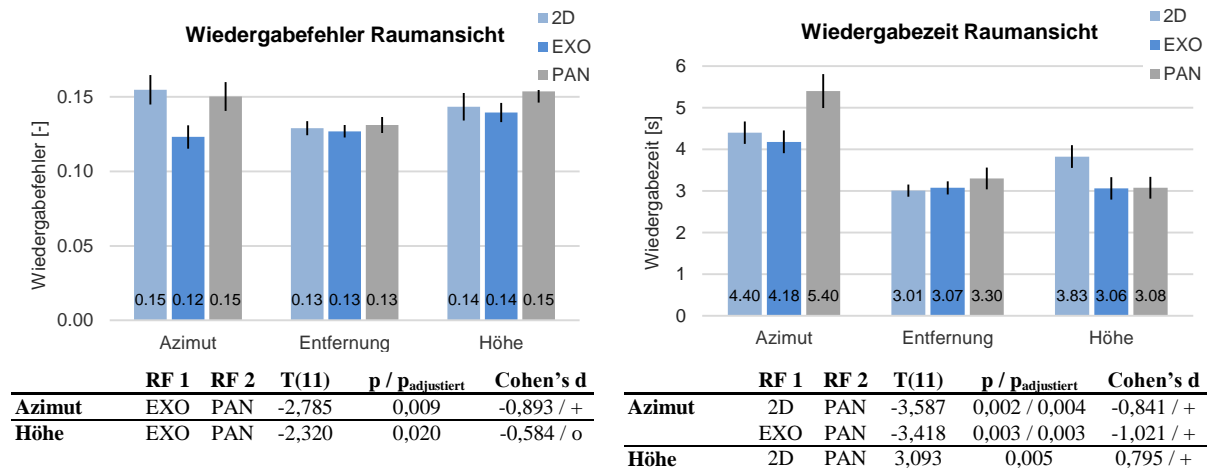
Bei den durch die Fragebögen erfassten subjektiven Daten ergeben sich pro Versuchsdurchlauf und Frage 18 Datenpunkte. Über alle Probanden kumuliert wurden somit insgesamt 216 Datenpunkte für jede abhängige Variable erhoben. Das subjektive Ranking bezüglich der Präferenz der einzelnen Ansichten wurde pro Proband hingegen nur einmal erfasst, weshalb für dieses 12 Datenpunkte verfügbar sind. Die Integrität aller subjektiven Daten beträgt jeweils 100 Prozent.

5.3.2. Objektive Leistungsdaten – Haupteffekte

Die Ergebnisse der Haupteffekte der Faktoren Raumformat, Objektanzahl und Fragentyp für die abhängigen Leistungsvariablen Wiedergabefehler und Wiedergabezeit werden in diesem Kapitel präsentiert. Die drei Raumdimensionen Azimut, Entfernung und Höhe werden für beide abhängigen Variablen separat betrachtet. Auf Paarvergleiche zwischen der zweidimensionalen und exozentrischen Ansicht wird verzichtet, da diese zur Hypothesenprüfung nicht erforderlich sind und gleichzeitig zu unnötig konservativen Ergebnissen der Signifikanzbeurteilung aufgrund der Alphafehlerkorrektur führen würden.

Mittelwerte und Standardfehler des Wiedergabefehlers und der Wiedergabezeit im Hauptfaktor Raumformat sind in Diagr. 5-1 dargestellt. Bezüglich des Wiedergabefehlers schneidet die Panoramaansicht in den Dimensionen Azimut und Höhe im Vergleich zu der exozentrischen Ansicht jeweils signifikant schlechter ab. Der Mittelwertunterschied beträgt 2,7 bzw. 1,5 Prozentpunkte. In der Dimension Azimut ist der ermittelte Effekt groß, in der Dimension Höhe ist er mittelgroß.

Bei der Wiedergabezeit weist die Panoramaansicht in der Dimension Azimut sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen, als auch im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht signifikante Defizite auf. Der Mittelwertunterschied beträgt 1,0 s bzw. 1,22 s. In der Dimension Höhe schneidet die Panoramaansicht im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht signifikant besser ab. Der Mittelwertunterschied beträgt dabei 0,75 s. Die ermittelten Unterschiede der Wiedergabezeit weisen alle einen großen Effekt auf.

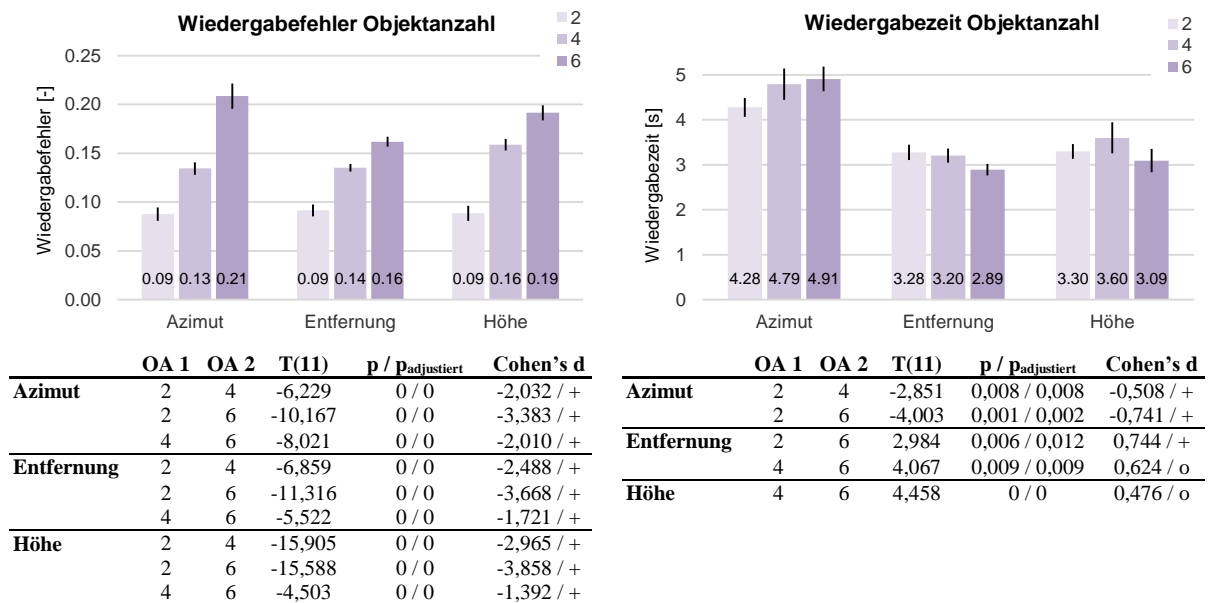


Diagr. 5-1: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Diagr. 5-2 visualisiert die objektiven Leistungsdaten des Faktors Objektanzahl. Bei Betrachtung der abhängigen Variable Wiedergabefehler wird dabei deutlich, dass in allen drei Raumdimensionen Azimut, Entfernung und Höhe signifikante Unterschiede zwischen Szenarien mit unterschiedlicher Objektanzahl bestehen. Der Wiedergabefehler nimmt dabei stets mit Zunahme der Objektanzahl zu. Der Effekt ist immer groß.

Für die Wiedergabezeit lassen sich ebenfalls in allen drei Raumdimensionen signifikante Unterschiede feststellen. In der Dimension Azimut schneiden Szenarien mit 2 Objekten signifikant besser ab als Szenarien mit 4 und 6 Objekten. Der Effekt ist in beiden Fällen groß. In der Dimension Entfernung schneiden Szenarien mit 6 Objekten signifikant schlechter ab als Szenarien mit 2 Objekten und als Szenarien mit 4 Objekten, wobei der Effekt einmal groß und einmal mittelgroß ist. Für die Raumdimension Höhe wird im Vergleich zwischen Szenarien mit 4 Objekten und Szenarien mit 6 Objekten ein mittelgroßer Effekt zu Gunsten der Szenarien mit 6 Objekten festgestellt.

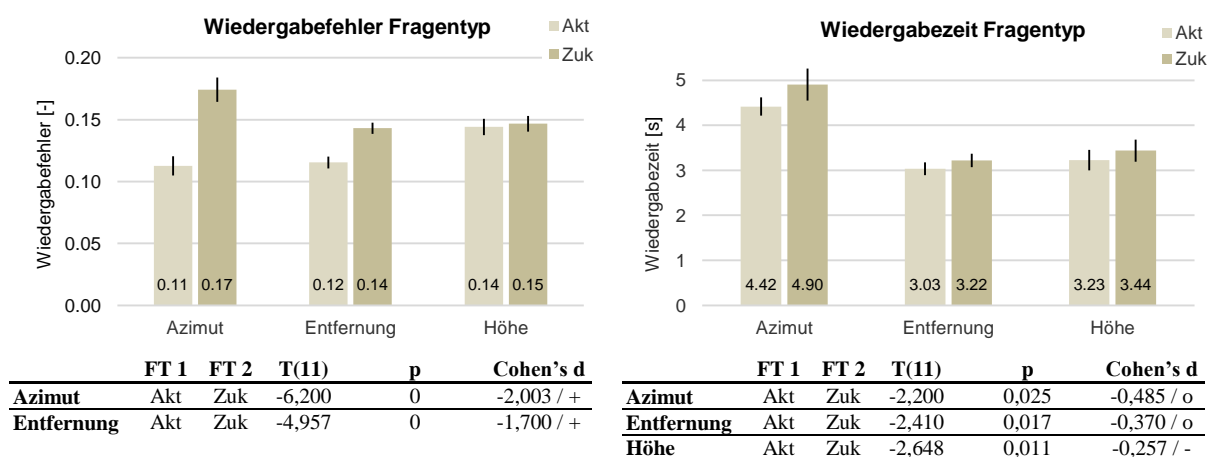
Versuch 1: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung



Diagr. 5-2: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Objektanzahl (OA)

Die Ergebnisse des Faktors Fragentyp sind in Diagr. 5-3 dargestellt. Für den Wiedergabefehler lassen sich sowohl in der Dimension Azimut als auch in der Dimension Entfernung signifikante Unterschiede zwischen der Frage nach der aktuellen und der zukünftigen Objektposition feststellen, wobei der Wiedergabefehler bei Fragen nach der aktuellen Position stets geringer ausfällt. Der Effekt ist jeweils groß.

Bezüglich der Wiedergabezeit werden in allen drei Raumdimensionen Azimut, Entfernung und Höhe signifikante Unterschiede zwischen der Frage nach der aktuellen Objektposition und nach der zukünftigen Objektposition ermittelt. Die Wiedergabezeit ist bei Fragen nach der aktuellen Objektposition in den Einzelvergleichen stets geringer. Der Effekt ist für die Dimensionen Azimut und Entfernung mittelgroß, wohingegen er für die Dimension Höhe klein ist.



Diagr. 5-3: Wiedergabefehler und Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Fragentyp (FT)

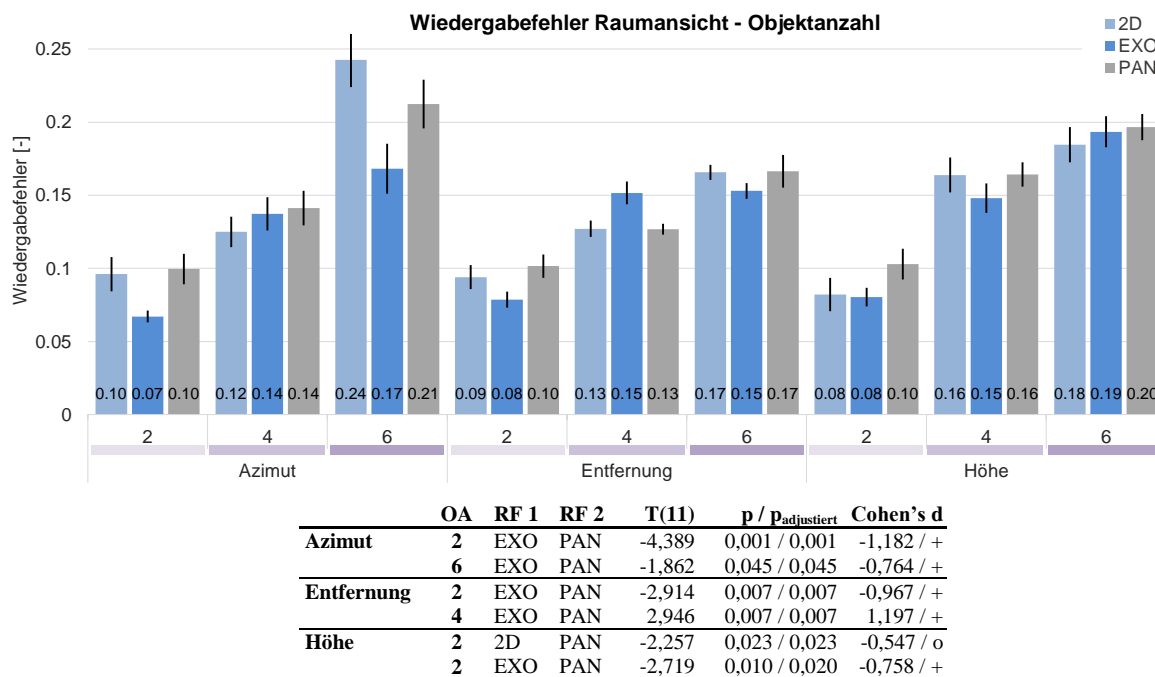
5.3.3. Objektive Leistungsdaten – Interaktionen 1. Ordnung

Durch Interaktionen 1. Ordnung werden Mittelwertunterschiede eines Faktors auf einer Stufe des anderen Faktors beschrieben. Eine zur Hypothesenprüfung erforderliche Faktorkombination umfasst die Einzelfaktoren Raumformat und Objektanzahl, wobei der Faktor Raumformat auf verschiedenen Stufen des Faktors Objektanzahl betrachtet wird.

Bei der Durchführung von Paarvergleichen dieser Faktorkombination für die abhängige Variable Wiedergabefehler (Diagr. 5-4) werden signifikante Unterschiede in allen drei Raumdimensionen ermittelt. Der azimuthale Fehler ist für Szenarien mit 2 Objekten bei Verwendung der exozentrischen Darstellung signifikant niedriger als bei Verwendung der Panoramaansicht. Der Effekt ist groß. Ein ähnlicher Unterschied wird bei Szenarien mit 6 Objekten festgestellt. Der dabei ermittelte Effekt ist ebenfalls groß.

In der Dimension Entfernung schneidet die exozentrische Ansicht im Vergleich zur Panoramaansicht bei Szenarien mit 2 Objekten signifikant besser ab. Umgekehrt verhält es sich bei Szenarien mit 4 Objekten, bei denen die Panoramaansicht signifikant besser abschneidet. Die ermittelten Effekte sind in beiden Fällen groß.

Bei der Betrachtung der Höhe werden Unterschiede ausschließlich für Szenarien mit 2 Objekten ermittelt. Die Panoramaansicht schneidet dabei sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen als auch im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht schlechter ab. Die Effekte sind dabei mittelgroß und groß.



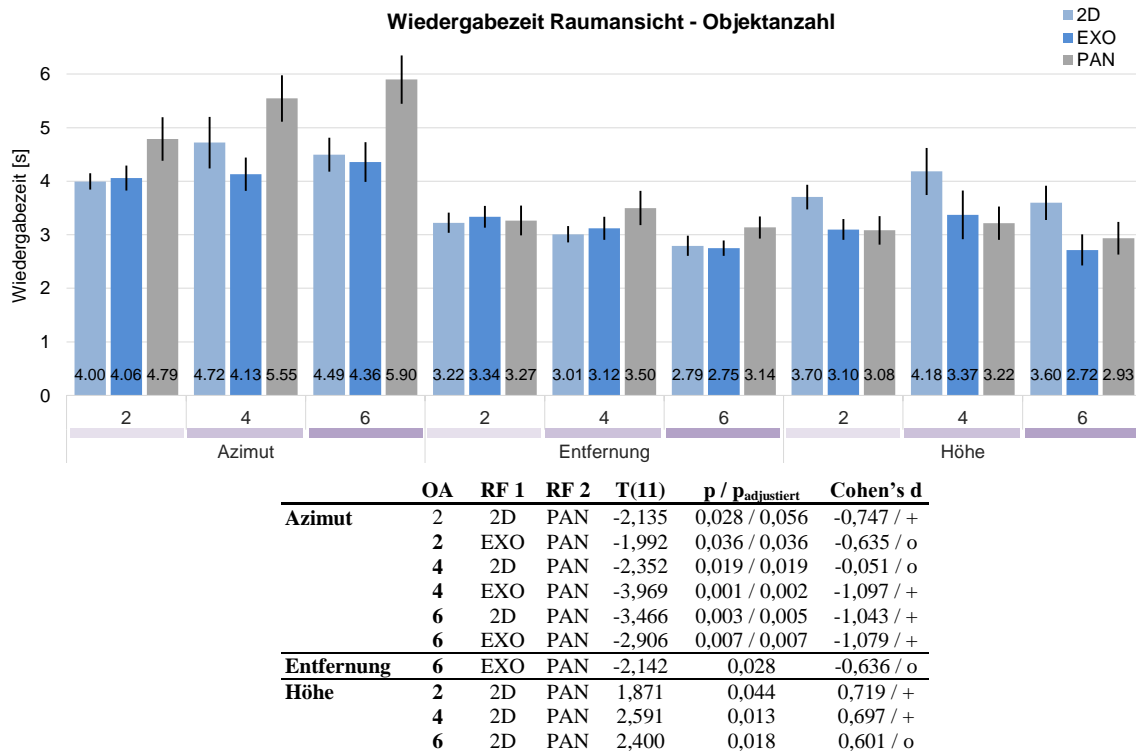
Diagr. 5-4: Wiedergabefehler für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Objektanzahl (OA)

Auch bei der Wiedergabezeit werden signifikante Unterschiede für alle drei Dimensionen Azimut, Entfernung und Höhe ermittelt. In der azimuthalen Dimension wird für Szenarien mit 2 Objekten ein signifikanter Unterschied zwischen der zweidimensionalen Ansicht und der Panoramaansicht zu Gunsten der zweidimensionalen Ansicht festgestellt. Der Effekt ist groß. Ein Vergleich zwischen der exozentrischen Ansicht und der Panoramaansicht führt zu einem ähnlichen Ergebnis, wobei der Unterschied nicht statistisch bedeutsam ist. Bei Szenarien mit sowohl 4 als auch 6 Objekten ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Panoramaansicht schneidet im Einzelvergleich mit der zweidimensionalen Ansicht und mit der exozentrischen Ansicht signifikant schlechter ab. Die Effekte sind dabei mittelgroß und groß.

Versuch 1: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung

Für die Dimension Entfernung wird für Szenarien mit 6 Objekten ein Unterschied zwischen exozentrischer und Panoramaansicht festgestellt, wobei die Panoramaansicht signifikant schlechter abschneidet. Der ermittelte Effekt ist mittelgroß.

Bei Betrachtung der Dimension Höhe werden Unterschiede beim Vergleich der zweidimensionalen Ansicht mit der Panoramaansicht zu Gunsten der Panoramaansicht festgestellt. Diese Unterschiede sind sowohl bei Szenarien mit 2, als auch bei Szenarien mit 4 und 6 Objekten signifikant. Die ermittelten Effekte sind mittelgroß und groß.

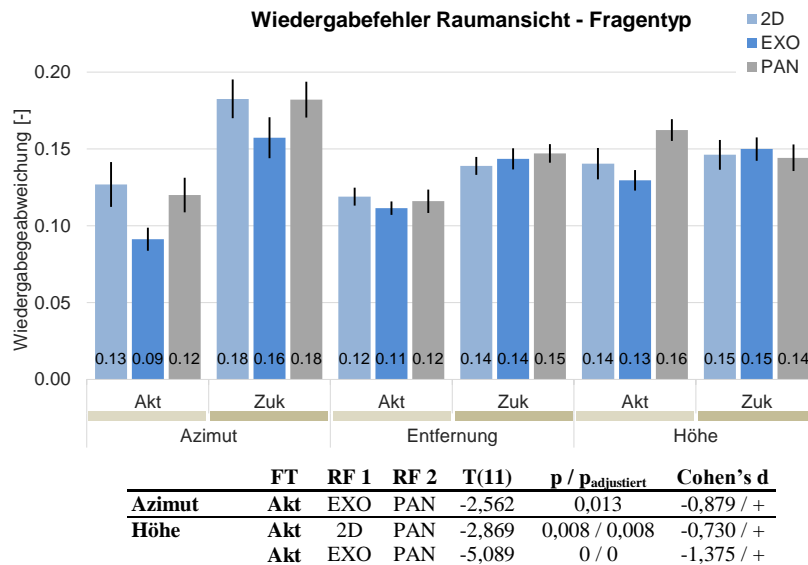


Diagr. 5-5: Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Objektanzahl (OA)

Die andere zur Hypothesenprüfung erforderliche Faktorkombination betrifft die Einzelfaktoren Raumformat und Fragentyp. Für die abhängige Variable Wiedergabefehler sind die Ergebnisse in Diagr. 5-6 visualisiert.

In den durchgeführten Paarvergleichen können insgesamt drei signifikante Unterschiede ermittelt werden. Der erste Unterschied wird in der Raumdimension Azimut bei der Frage nach der aktuellen Position festgestellt. Dabei schneidet die exozentrische Ansicht signifikant besser ab als die Panoramaansicht. Der Effekt ist groß.

Die anderen beiden Unterschiede treten in der Dimension Höhe bei der Frage nach der aktuellen Position auf. Die Frage wird mit der Panoramaansicht sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen als auch mit der exozentrischen Ansicht ungenauer beantwortet. Die Effekte sind für beide Einzelvergleiche groß.

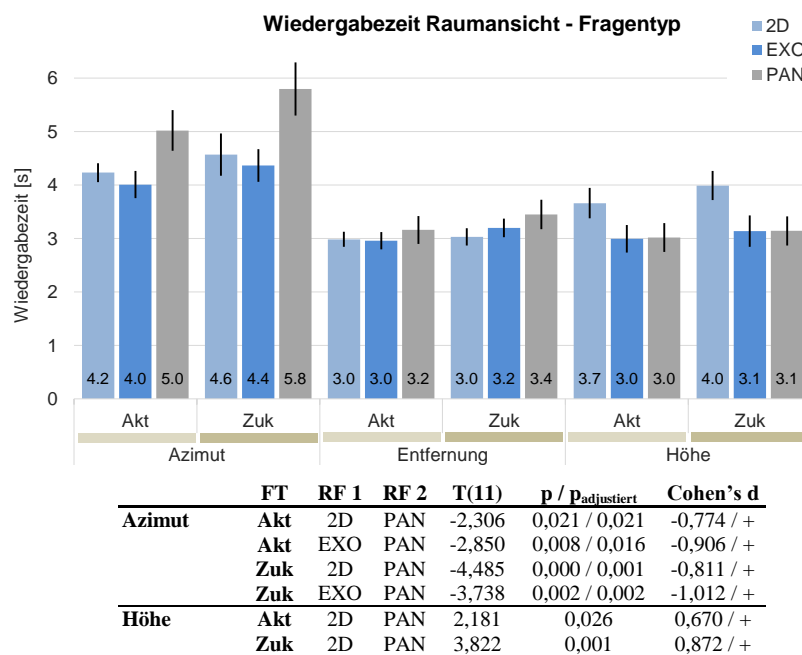


Diagr. 5-6: Wiedergabefehler für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit des Fragentyps (FT)

Die Ergebnisse für die Wiedergabezeiten sind in Diagr. 5-7 dargestellt. Bei der Durchführung von Einzelvergleichen werden analog der Wiedergabegenauigkeit signifikante Unterschiede in den Dimensionen Azimut und Höhe festgestellt.

In der azimutalen Dimension führen die Einzelvergleiche sowohl bei der Frage nach der aktuellen als auch bei der Frage nach der zukünftigen Position zu signifikanten Unterschieden. Dabei schneidet die Panoramaansicht im Vergleich zu beiden konventionellen Ansichten schlechter ab. Der Effekt ist in allen vier Einzelvergleichen groß.

Bei der Betrachtung der Dimension Höhe kann sowohl für die Frage nach der aktuellen Position als auch für die Frage nach der zukünftigen Position ein signifikanter Unterschied zwischen der Panoramaansicht und der zweidimensionalen Ansicht zu Gunsten der Panoramaansicht festgestellt werden. Der ermittelte Effekt ist jeweils groß.



Diagr. 5-7: Wiedergabezeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit des Fragentyps (FT)

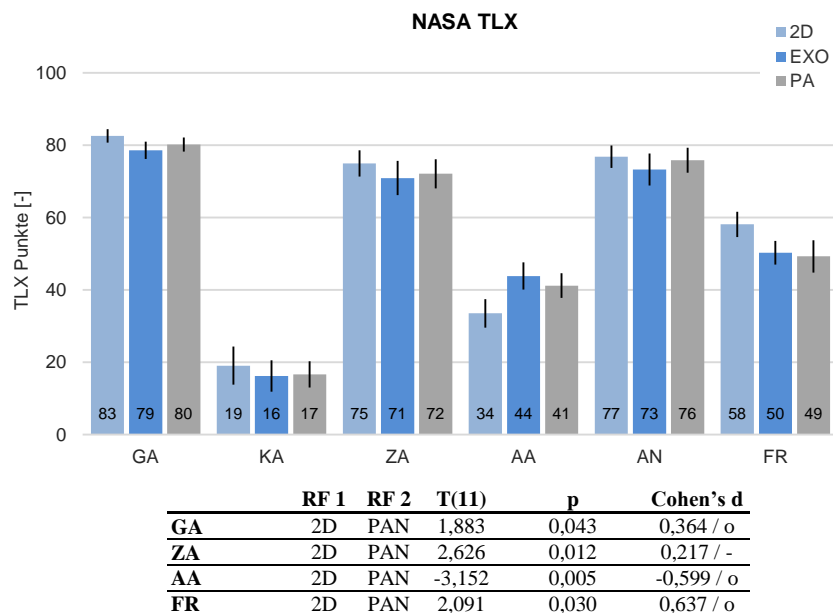
5.3.4. Subjektive Daten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Datenerhebung bezüglich des Hauptfaktors Raumformat präsentiert. Diese umfassen Kenngrößen des NASA TLX Fragebogens, des SART Fragebogens sowie eine Rangfolge bezüglich der Eignung der drei Formate für die zu bearbeitende Aufgabe.

Die Ergebnisse des NASA TLX Fragebogens sind in Diagr. 5-8 visualisiert. Paarvergleiche zwischen der zweidimensionalen Ansicht und der Panoramaansicht in den Modalitäten Geistige Anforderung (GA), Zeitliche Anforderung (ZA) und Frustration (FR) ergeben einen Unterschied zu Gunsten der Panoramaansicht. Im Gegensatz zu allen anderen Modalitäten, repräsentieren bei der Aufgabenerfüllung (AA) hohe Werte eine gute Eignung der Ansicht. Der in dieser Modalität ermittelte signifikante Unterschied zwischen zweidimensionaler Ansicht und Panoramaansicht lässt sich ebenfalls in einer besseren Eignung der Panoramaansicht konstatieren.

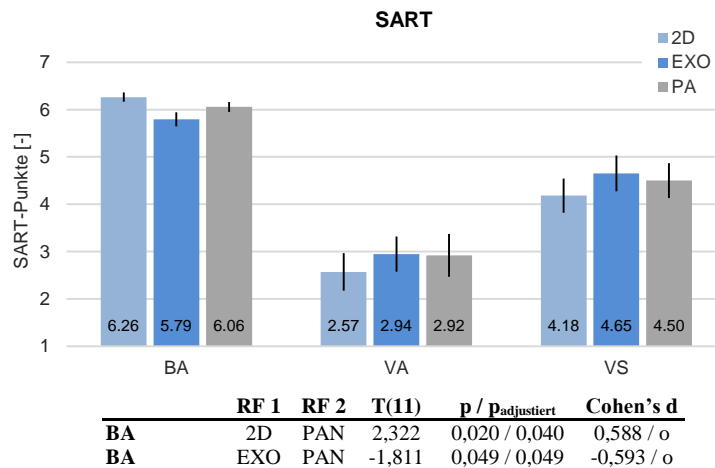
Mit Ausnahme der Zeitlichen Anforderung, deren Effekt niedrig ist, sind alle Effekte für diesen Paarvergleich mittelgroß.

Zwischen der exozentrischen Ansicht und der Panoramaansicht können keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden.



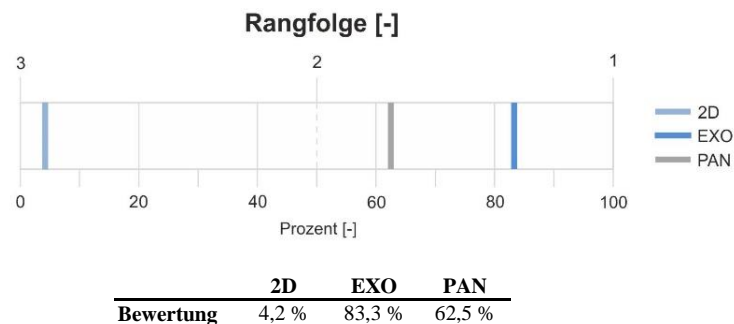
Diagr. 5-8: NASA TLX für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Diagr. 5-9 visualisiert die Ergebnisse der SART Befragung. Während die Kategorie Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen einen möglichst niedrigen Wert aufweisen sollte, müssen die Werte der Kategorien Verfügbarkeit an Aufmerksamkeitsressourcen und Verständnis der Situation möglichst hoch sein. Signifikante Unterschiede in der Bewertung der Ansichten können ausschließlich in der Kategorie Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen (BA) festgestellt werden. Dabei schneidet die Panoramaansicht im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht signifikant besser ab. Verglichen mit der exozentrischen Ansicht, schneidet die Panoramaansicht in dieser Kategorie jedoch signifikant schlechter ab. Der Effekt ist bei beiden Vergleichen mittelgroß.



Diagr. 5-9: SART für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Die für die Aufgabenerfüllung präferierte Rangfolge der Ansicht ist in Diagr. 5-10 dargestellt. Die exozentrische Ansicht weist die beste Bewertung auf, gefolgt von der Panoramaansicht. Der Unterschied zwischen beiden beträgt 20,8 Prozentpunkte. Die deutlich schlechteste Bewertung ist für die zweidimensionale Ansicht festzustellen. Die Differenz zur Panoramaansicht beträgt 58,3 Prozentpunkte.



Diagr. 5-10: Subjektive Rangfolge bezüglich der Eignung des Raumformats (RF) für die zu bearbeitende Aufgabe

5.4. Diskussion

Bei der Betrachtung des Wiedergabefehlers für den ersten Hauptfaktor Raumformat wird deutlich, dass die Panoramaansicht im direkten Vergleich mit der exozentrischen Ansicht sowohl in der Dimension Azimut als auch in der Dimension Höhe schlechter abschneidet (Diagr. 5-1). Für die Dimension Azimut ist dies aufgrund des in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Hemisphäreneffekts erwartungskonform. Zudem gaben die Probanden an, dass die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Diskontinuität der Azimutskala immer dann für Verwirrungen sorgte, wenn ein Objekt den linken oder rechten Bildbereich verließ. Überraschend ist hingegen, dass der Vergleich zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht in dieser Dimension aufgrund der genannten Effekte nicht auch zu Lasten der Panoramaansicht ausfällt. Eine mögliche Begründung hierfür liegt in der Teilung von Aufmerksamkeitsressourcen und der erhöhten Arbeitsbelastung bei der Interaktion mit nichtintegrierten Darstellungen. Der in der Höhendimension ermittelte Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht lässt sich durch die linearperspektivische Skalierung der Panoramaansicht erklären. Während Konzept und Visualisierung der Lotlinien und Lotlinienskalen für beide Ansichten identisch sind, werden bei der Panoramaansicht aufgrund der Zentralprojektion weit entfernte Objekte sowie deren Lote niedriger aufgelöst. Im Gegensatz zur exozentrischen Ansicht war ein exaktes Ablesen der Höhe für diese Objekte daher nur schwer möglich. Obwohl sich die Linearperspektive auch auf die Darstellung der Dimension Entfernung auswirkt, lässt sich in dieser Dimension kein Unterschied zwischen den verschiedenen Ansichten feststellen. Auffällig ist auch, dass die doppelte Vieldeutigkeit der exozentrischen Ansicht offensichtlich keine oder nur vernachlässigbare negative Auswirkungen auf den Wiedergabefehler hat. Die Ursache hierfür liegt in der exozentrischen, gebundenen Darstellung, welche die eigene Objektposition stets an derselben Stelle erscheinen lässt. Eine doppelte Vieldeutigkeit ist durch die Kenntnis der Position somit nicht gegeben.

Die für die Wiedergabezeit ermittelten Unterschiede zwischen den konventionellen Darstellungen und der Panoramaansicht beschränken sich ebenfalls auf die Schätzung des Azimuts und der Höhe (Diagr. 5-1). In der Azimutdimension weist die Panoramaansicht sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen als auch mit der exozentrischen Darstellung Defizite auf, die sich in Form einer größeren Wiedergabezeit äußern. Als Gründe hierfür sind der Hemisphäreneffekt sowie die geradlinige Winkelskala der Panoramaansicht zu nennen. Bei der Betrachtung der Wiedergabezeiten für die Objekthöhen wird deutlich, dass mit fusionierten Abbildungen, wie der exozentrischen und der Panoramaansicht, die Wiedergabe eines Höhenwertes weniger Zeit erforderte als bei der zweidimensionalen, nicht-fusionierten Ansicht. Bei der zweidimensionalen Darstellung waren in der linken Abbildung Objektazimut- und -entfernungswerte aufgetragen. Um die zugehörige Objekthöhe zu erfassen, war ein Mapping auf die rechte Abbildung, in der die Objekthöhe über der horizontalen Objektentfernung aufgetragen war, erforderlich. Dieses Mapping erforderte zusätzliche Zeit, die sich letztlich auch in einer erhöhten Wiedergabezeit widerspiegelte.

Der zweite Hauptfaktor, die Objektanzahl, diente dazu, die Schwierigkeit der zu bearbeitenden Aufgabe zu variieren. Dass dies erfolgreich gelungen ist, lässt sich bei der Betrachtung der Wiedergabefehler für verschiedene Objektanzahlen erkennen (Diagr. 5-2). Dabei wird deutlich, dass in allen drei Dimensionen der Schätzfehler für 2 Objekte am niedrigsten ist, für 4 Objekte zunimmt und für 6 Objekte deutlich am größten ist. Dieser Effekt ist auf die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses der Probanden zurückzuführen. Dessen Leistungsfähigkeit wird entsprechend Wickens [7] vor allem durch die Ähnlichkeit von Informationen, die Anzahl von Informationselementen und die Dauer des Speicherns beeinflusst. Da die Auswahl des wiederzugebenden Objektes zufällig erfolgte, mussten sich die Probanden die Attribute aller relevanten Objekte, die aufgrund ihres numerischen Charakters eine hohe Ähnlichkeit aufweisen, merken. Mit zunehmender Objektanzahl war dies natürlich deutlich schwieriger, was zu einer Erhöhung des Wiedergabefehlers führte. Die verschiedenen Wiedergabezeiten erlauben jedoch den Schluss, dass insbesondere bei 6 Objekten die Probanden mit der Bearbeitung der Aufgabe teilweise überfordert waren, da die Wiedergabezeiten in den Dimensionen Entfernung und Höhe für 6 Objekte entgegen der Erwartung niedriger sind, als die Wiedergabezeiten für 4 Objekte. Für die Azimutdimension wird dieser Effekt nicht beobachtet. Der Azimutwert war in der dargebotenen Antwortmaske stets als erster Wert wiederzugeben. Es wird daher vermutet, dass diese Dimension beim Erfassen priorisiert wurde und dadurch stets eine vergleichsweise schnelle

Wiedergabe möglich war. Die niedrigen Wiedergabezeiten für 6 Objekte in den Dimensionen Entfernung und Höhe deuten hingegen darauf hin, dass diese Werte gelegentlich geraten werden mussten.

Der dritte Hauptfaktor, der Fragentyp, bildete die Unterscheidung der Stufen 2 und 3 von Situationsbewusstsein ab, also die Verständnis- und Antizipationsebene. Da die Antizipation neben dem Verständnis der aktuellen Situation zusätzlich die Kenntnis weiterer Objektattribute voraussetzt, wurde durch diesen Faktor ebenfalls die Schwierigkeit variiert. Bezüglich der Wiedergabezeit wird dies in den Dimensionen Azimut und Entfernung deutlich, in denen bei der Frage nach der aktuellen Position exakter geschätzt wurde als bei der Frage nach der zukünftigen Position (Diagr. 5-3). Neben der aktuellen Position mussten die Probanden sich für die Schätzung der zukünftigen Position zusätzlich Objektkurse und die Objektgeschwindigkeiten merken und daraus mental die Objektposition in einem zukünftigen Zeitfenster von 45 s projizieren. Dieser Vorgang erforderte zusätzliche mentale Ressourcen und war Fehler behaftet, wie die Ergebnisse zeigen. Bezüglich der Höhe wird hingegen kein Unterschied ermittelt, was vor dem Hintergrund eines ausschließlich horizontalen Objektflugverhaltens auch plausibel ist. Der zusätzliche Ressourcenbedarf bei der Frage nach der zukünftigen Objektposition wird auch bei Betrachtung der Wiedergabezeit deutlich. In allen drei Raumdimensionen erforderte die Schätzung der zukünftigen Objektposition mehr Zeit als die Schätzung der aktuellen Position, wobei der Unterschied in der Dimension Entfernung und Höhe gering ausfällt.

Für die Faktorkombination Raumformat und Objektanzahl ist bezüglich des Wiedergabefehlers kein eindeutiges Muster erkennbar (Diagr. 5-4). Der Schätzfehler ist unter Verwendung der Panoramaansicht zwar in fast allen Fällen größer als bei der exozentrischen Ansicht, der Unterschied ist jedoch nicht immer signifikant. Des Weiteren wird ein Ausreißer für die Dimension Entfernung festgestellt, bei der der Wiedergabefehler mit der Panoramaansicht niedriger ist als mit der exozentrischen Ansicht. Da der absolute Wiedergabefehlermittelwert der exozentrischen Ansicht den der Panoramaansicht bei insgesamt neun Paarvergleichen nur einmal über und viermal unterschreitet, kann zumindest ein Trend abgeleitet werden, der darauf deutet, dass unabhängig der dargebotenen Objektanzahl der Wiedergabefehler mit der exozentrischen Ansicht am niedrigsten ist. Der Paarvergleich zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht hinsichtlich des Wiedergabefehlers lässt aufgrund der geringen Mittelwertunterschiede hingegen keine wertende Aussage zu.

Betrachtet man die Wiedergabezeit für diese Faktorstufenkombination, so erkennt man zwei recht eindeutige Muster (Diagr. 5-5). Das erste Muster zeichnet sich innerhalb der Raumdimension Azimut für beide Paarvergleiche mit der Panoramaansicht ab. Unabhängig von der Objektanzahl wurde für die Wiedergabe der Objektposition mit der Panoramaansicht stets mehr Zeit benötigt als mit konventionellen Darstellungen. Die Mittelwertunterschiede sind mit einer Ausnahme signifikant. Unabhängig davon deutet dieses Muster darauf hin, dass bei der Panoramaansicht der Hemisphärenereffekt unabhängig vom Schwierigkeitsgrad immer zum Tragen kam. Des Weiteren erforderte das Übersetzen von auf einer Längenskala aufgetragenen Winkelmaßen zusätzliche mentale Prozesse, die sich in einer erhöhten Aufgabebearbeitungszeit widerspiegeln (Kap. 3.4.1). Ein zweites Muster ist in der Dimension Höhe beim Paarvergleich der Panoramaansicht mit der zweidimensionalen Ansicht erkennbar. Dabei wird deutlich, dass die Wiedergabe der Objekthöhe mit der zweidimensionalen Ansicht unabhängig der Objektanzahl stets mehr Zeit erforderte als mit der Panoramaansicht. Dieser Effekt ist erwartungskonform, wenn man wieder berücksichtigt, dass die zweidimensionale Ansicht im Gegensatz zu den anderen beiden Darstellungsarten keine fusionierte Ansicht ist. Da der Fusionsvorgang für jedes der dargestellten Objekte erfolgen musste, wäre eigentlich zu erwarten gewesen, dass der Effekt mit zunehmender Objektanzahl sogar weiter zunimmt. Dies kann anhand der vorliegenden Messdaten jedoch nicht bestätigt werden.

Die zweite untersuchte Faktorkombination umfasst das Raumformat zusammen mit dem Fragentyp. Bezüglich des Wiedergabefehlers lässt sich hierbei wieder kein eindeutiges Muster erkennen (Diagr. 5-6). Es lässt sich lediglich die Tendenz ableiten, dass für die Raumdimension Azimut der Wiedergabefehler sowohl bei der Frage nach der aktuellen als auch bei der Frage nach der zukünftigen Position bei Verwendung der exozentrischen Ansicht geringer ausfällt als bei Verwendung der Panoramaansicht. Der Unterschied ist bei der Frage nach der zukünftigen Position jedoch nicht statistisch bedeutsam.

Für die Wiedergabezeit lassen sich dieselben beiden Muster erkennen wie bei der oben beschriebenen Faktorstufenkombination Raumformat Objektanzahl (Diagr. 5-7). Die Wiedergabezeit in der azimuthalen Dimension ist unter Verwendung der Panoramaansicht wieder größer als unter Verwendung einer der konventionellen Ansichten. Ferner wird festgestellt, dass für die Wiedergabe der Höhe unter Verwendung der zweidimensionalen Ansicht wieder länger benötigt wurde als mit der Panoramaansicht. Die Ergebnisse beider untersuchter Faktorkombinationen passen insofern gut zusammen, als dass sowohl unterschiedliche Objektanzahlen als auch unterschiedliche Level von Situationsbewusstsein, die in den beiden Fragentypen abgebildet wurden, eine Variation des Schwierigkeitsgrades der Aufgabe darstellen. Die Ursachen dieser Muster sind für die Dimension Azimut daher wieder auf den Hemisphäreneffekt und die geradlinige Azimutwinkelskala, und für die Dimension Höhe wieder auf die fusionierte Informationsdarstellung der Panoramaansicht zurückzuführen.

Die Ergebnisse des NASA TLX Fragebogens deuten darauf hin, dass die subjektive Arbeitsbelastung während der Aufgabendurchführung unter Verwendung der zweidimensionalen Ansicht höher war als unter Verwendung der Panoramaansicht (Diagr. 5-8). Dies betrifft sowohl die Geistige Anforderung (GA), die Zeitliche Anforderung (ZA), die Aufgabenerfüllung (AA) als auch die Frustration (FR). Als Erklärungsansatz für die Geistige Anforderung lässt sich der für die Fusion verschiedener Ansichten erforderliche zusätzliche Ressourcenbedarf aufführen. Dieser war offenbar so hoch, dass er die Probanden subjektiv mehr belastete als der zusätzliche Aufwand zur Transformation der Azimutskala in der Panoramaansicht. Ähnlich verhält es sich mit der zeitlichen Anforderung. Diese war bei der zweidimensionalen Ansicht zum einen höher, weil der Blick der Probanden permanent zwischen zwei verschiedenen Ansichten schweifen musste. Andererseits ist aufgrund der allgemein hohen Arbeitsbelastung davon auszugehen, dass die zur Ansichtsfusion benötigten kognitiven Ressourcen nicht parallel freigegeben werden konnten und daher dieser zusätzliche Schritt sequentiell zu den anderen Schritten abgearbeitet wurde. Besonders interessant erscheint die schlechte Bewertung des Aufgabenerfüllungsgrades mit der zweidimensionalen Ansicht, da dies die erhobenen objektiven Daten nicht widerspiegelt. Während die zweidimensionale Ansicht Defizite bei der Wiedergabe der Objekthöhe aufweist, schneidet die Panoramaansicht in der Dimension Höhe schlechter ab. Dennoch wurde die zweidimensionale Ansicht hinsichtlich des Aufgabenerfüllungsgrades schlechter bewertet. Eine Erklärung dieses Effektes ist anhand der erhobenen Daten nicht möglich. Die letzte Modalität, in der ein Unterschied zu Gunsten der Panoramaansicht ermittelt wird, umfasst die Frustration. Das schlechte Abschneiden der zweidimensionalen Ansicht lässt sich dadurch erklären, dass diese Modalität eine Kombination der anderen Kategorien darstellt. Sie wurde aufgrund der schlechten Bewertungen in den bereits betrachteten Kategorien in logischer Konsequenz auch schlecht bewertet. In den Modalitäten Anstrengung (AN) und körperliche Anforderung (KA) sind keine Unterschiede feststellbar. Die ermittelten numerischen Daten spiegeln im Wesentlichen auch die Aussagen der Probanden wider, die während des Versuchs festgehalten wurden.

Zwischen der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht kann hingegen in keiner Modalität ein Unterschied ermittelt werden. Dies ist bemerkenswert, da die erhobenen Leistungsdaten signifikante Unterschiede zu Gunsten der exozentrischen Ansicht aufweisen. Unabhängig des exakten Projektionsalgorithmus scheint daher der wesentliche Faktor bezüglich der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung bei der Positionswiedergabe der Integrationsgrad der Darstellung zu sein. Dieser ist sowohl bei der exozentrischen Ansicht, als auch bei der Panoramaansicht hoch.

Die Ergebnisse des SART Fragebogens spiegeln eine subjektive Beurteilung des eigenen Situationsbewusstseins wider (Diagr. 5-9). Sie weisen lediglich in der Kategorie Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen (BA) signifikante Unterschiede für die verschiedenen Ansichten auf. Dabei wurde die exozentrische Ansicht im Vergleich zur Panoramaansicht deutlich besser beurteilt, wobei letztere im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht wiederum deutlich weniger Aufmerksamkeitsressourcen erforderte. Die schlechte Beurteilung der zweidimensionalen Ansicht in dieser Kategorie lässt sich wieder durch den zusätzlichen Such- und mentalen Integrationsaufwand beim Verständnis von Objektpositionen erklären. Der Unterschied zwischen den beiden integrierten Raumformaten ist primär auf den Hemisphäreneffekt der Panoramaansicht zurückzuführen, der bei dem Verständnis azimuthaler Objektkoordinaten zum Tragen kam. Ferner wird vermutet, dass auch aufgrund der perspektivischen Eigenschaften der Panoramaansicht, wie beispielsweise die reduzierte Auflösung von Längenmaßen in

großen Entfernungen, beim Erfassen von Objektentfernungen und Objekthöhen zusätzliche Aufmerksamkeitsressourcen benötigt wurden.

In den beiden verbleibenden Kategorien Verfügbarkeit an Aufmerksamkeitsressourcen (VA) und Verständnis der Situation (VS), die ebenfalls durch den SART erfasst wurden, werden aufgrund der großen Streuung der Messwerte keine signifikanten Unterschiede ermittelt.

Die Rangfolge der drei Raumformate repräsentiert die subjektive Beurteilung der Eignung der Raumformate hinsichtlich der im Versuch zu bearbeitenden Aufgabe (Diagr. 5-10). Bei dieser Erhebung wurde die exozentrische Ansicht als am besten gewertet, wobei der Vorteil gegenüber der Panoramaansicht nur gering ist. Anders verhält es sich beim Vergleich der Panoramaansicht mit der zweidimensionalen Ansicht. Der Unterschied zu Gunsten der Panoramaansicht ist dabei deutlich. Dieses Ergebnis deckt sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen des NASA TLX und des SART Fragebogens, bei denen die zweidimensionale Ansicht ebenfalls am schlechtesten abschneidet und die exozentrische Ansicht tendenziell Vorteile gegenüber der Panoramaansicht aufweist. Die Ursache für das sehr gute Abschneiden der exozentrischen Ansicht liegt in der integrierten Darstellung, welche die Erfassung aller drei Koordinatenkomponenten fördert. Das gute Abschneiden der Panoramaansicht ist insofern verwunderlich, als dass in den Leistungsdaten deutliche Defizite bei der Erfassung der azimutalen Dimension feststellbar sind. Laut Probandenaussagen eignet sich diese Darstellungsart aber vor allem, wenn der Fokus auf der Erfassung der Raumdimension Entfernung liegt, obgleich diese Aussage durch die objektiven Leistungsdaten nicht bestätigt werden kann. Die Ursache für die schlechte Bewertung der zweidimensionalen Ansicht liegt, entsprechend der Aussagen der Versuchsteilnehmer, in der Wiedergabe der Dimension Höhe. Aufgrund der hohen Auflösung wird diese zwar prinzipiell gut erfassbar visualisiert. Es sei jedoch schwierig, diese dem korrekten Objekt zuzuordnen.

5.5. Hypothesenprüfung

Um die in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen mit Hilfe der in Kapitel 5.3 erzielten Ergebnisse zu überprüfen, sind logische Verknüpfungen zwischen den mit T-Tests durchgeführten Einzelvergleichen erforderlich. Dies betrifft insbesondere die objektiven Leistungsdaten, bei denen die drei Raumdimensionen Azimut, Entfernung und Höhe, die beiden Leistungsmaße Wiedergabefehler und Wiedergabezeit sowie die Ausprägungen eines weiteren Hauptfaktors für eine ganzheitliche Betrachtung zusammengefasst werden müssen. Dabei wird auf eine mehrwertige Logik zurückgegriffen, die im Gegensatz zur konventionellen zweiwertigen Logik drei Zustände berücksichtigt (Tab. 5-1). Diese umfassen „Panoramaansicht ist besser als die konventionelle Ansicht“, „Panoramaansicht ist schlechter als die konventionelle Ansicht“ und „kein Unterschied zwischen der Panoramaansicht und der konventionellen Ansicht“. Die Zustände werden, basierend auf den in Tab. 5-1 gelisteten Regeln, jeweils durch „UND“ bzw. „ODER“ Verknüpfungen miteinander kombiniert und auf der nächst höheren Ebene zu einem resultierenden Zustand zusammengefasst. Je nach Hypothese erfolgt dies einfach oder mehrfach, bis die finale Ebene, die Formatebene, erreicht ist.

Sofern die Kombination von Vergleichsoperatoren auf der nächst höheren Ebene einen gerichteten Unterschied zur Folge hat, wird für dieses Ereignis die Irrtumswahrscheinlichkeit p_{Res} ermittelt. Dazu werden die gängigen Regeln der Wahrscheinlichkeitstheorie [13] angewandt, wobei jeweils nicht mit der Irrtumswahrscheinlichkeit p , sondern mit der Wahrscheinlichkeit des zum Irrtum komplementären Ereignisses \bar{p} gerechnet wird. Mit Hilfe des final ermittelten Vergleichsoperators und der zugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeit wird die Hypothese schließlich geprüft. Vergleiche zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht und zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht werden getrennt betrachtet und nicht miteinander kombiniert.

Tab. 5-1: Deklaration der dreiwertigen Logik zur Prüfung der Hypothesen

Logischer Operator	Ergebnis	Vergleichsoperator	Kombination aus n Operatoren $i = 1 \dots n, n = 2 \dots 6, i, n \in N$	Resultierende Irrtumswahrscheinlichkeit
UND	PAN besser	$< (p_{Res})$	- $k_i = \{<\}$	$\bar{p}_{Res} = \bar{p}(k_1) \cdot \dots \cdot \bar{p}(k_n)$
	PAN schlechter	$> (p_{Res})$	- $k_i = \{>\}$	
	Kein Untersch.	=	- Alle verbleibenden Kombinationen	- Keine Aussage
ODER	PAN besser	$< (p_{Res})$	- Mind. 1 $k_i = \{<\}$ - $k_i = \{=\}$	$\bar{p}_{Res} = \bar{p}(k_1) + \bar{p}(k_2) - \bar{p}(k_1) \cdot \bar{p}(k_2)$ - n-1 maliges iteratives Vorgehen bei n Operatoren $\bar{p}(k_i) = 0$ für $k_i = \{=\}$
	PAN schlechter	$> (p_{Res})$	- Mind. 1 $k_i = \{>\}$ - $k_i = \{=\}$	
	Kein Untersch.	=	- Alle verbleibenden Kombinationen	- Keine Aussage

Für alle Hypothesen werden sämtliche durchgeführten Operationen anschaulich in tabellarischer Form dargestellt. Die linke Hälfte einer solchen Tabelle beschreibt die Konfiguration, bei welcher der Einzelvergleich stattfand. Die rechte Hälfte beinhaltet die Ergebnisse der Vergleiche auf den verschiedenen Ebenen.

Direkt neben dem Vergleichsoperator werden für Ungleichheitszeichen auch die Irrtumswahrscheinlichkeiten p und, auf der Ebene auf denen die T-Tests erfolgten, qualitativ die zugehörigen Effektgrößen in Klammern dargestellt. Vergleiche, die einen Vorteil zu Gunsten der Panoramaansicht indizieren, werden in grüner Zellenfarbe und Vergleiche, die einen Vorteil zu Gunsten einer konventionellen Ansicht indizieren, werden in oranger Zellenfarbe hervorgehoben.

H 1.1) Die erzielte objektive Leistung hinsichtlich der Erfassung dreidimensionaler Positionskordinaten ist bei der Verwendung konventioneller Anzeige höher als beim Panoramaformat.

Tab. 5-2: Logiktablelle H 1.1)

Konfiguration			Wertung		
Vergleich Format	Abhängige Variable	Komponente	Komp.-ebene (T-Tests)	Variablenebene (ODER)	Formatebene (ODER)
PAN-2D	Wiedergabe- fehler	Azimut	=	=	=
		Entfernung	=		
		Höhe	=		
	Wiedergabe- zeit	Azimut	> (0,002 / +)	=	
		Entfernung	=		
		Höhe	< (0,005 / +)		
PAN-EXO	Wiedergabe- fehler	Azimut	> (0,009 / +)	> (0,000)	> (0,000)
		Entfernung	=		
		Höhe	> (0,002 / o)		
	Wiedergabe- zeit	Azimut	> (0,003 / +)	> (0,003)	
		Entfernung	=		
		Höhe	=		

PAN – 2D: Die Hypothese H 1.1) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht. Auf Komponentenebene existieren insgesamt zwei signifikante Unterschiede, die aufgrund ihrer gegensätzlichen Ausprägung als sich gegenseitig kompensierend betrachtet werden.

PAN – EXO: Die Hypothese H 1.1) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 0,0 % und ist somit kleiner als 5 %. Die einfließenden Effekte umfassen beide abhängigen Variablen und die Dimensionen Azimet und Höhe. Sie sind mittelgroß bis groß.

H 1.1 a) *Der Leistungsvorteil konventioneller Anzeigen gegenüber dem Panoramaformat besteht sowohl bei dem Verständnis von aktuellen als auch bei der Antizipation von zukünftigen dreidimensionalen Positionskordinaten.*

Tab. 5-3: Logiktable H 1.1 a)

Konfiguration				Wertung			
Vergleich Format	Abhängige Variable	Komponente	Fragentyp	Fragentyp (T-Tests)	Komp.-ebene (Log. UND)	Variablenebene (Log. ODER)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	Wiedergabe -fehler	Azimut	Aktuell	=	=	=	=
			Zukunft	=			
		Entfernung	Aktuell	=	=		
			Zukunft	=			
		Höhe	Aktuell	> (0,008 / +)	=		
			Zukunft	=			
	Wiedergabe -zeit	Azimut	Aktuell	> (0,021 / +)	> (0,022)	=	
			Zukunft	> (0,001 / +)			
		Entfernung	Aktuell	=	=		
			Zukunft	=			
		Höhe	Aktuell	< (0,026 / +)	< (0,027)		
			Zukunft	< (0,001 / +)			
PAN-EXO	Wiedergabe -fehler	Azimut	Aktuell	> (0,013 / +)	=	=	> (0,018)
			Zukunft	=			
		Entfernung	Aktuell	=	=		
			Zukunft	=			
		Höhe	Aktuell	> (0,000 / +)	=		
			Zukunft	=			
	Wiedergabe -zeit	Azimut	Aktuell	> (0,016 / +)	> (0,018)	> (0,018)	
			Zukunft	> (0,002 / +)			
		Entfernung	Aktuell	=	=		
			Zukunft	=			
		Höhe	Aktuell	=	=		
			Zukunft	=			

PAN – 2D: Die Hypothese H 1.1 a) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht. Auf Komponentenebene existieren insgesamt zwei signifikante Unterschiede, die aufgrund ihrer gegensätzlichen Ausprägung als sich gegenseitig kompensierend betrachtet werden.

PAN – EXO: Die Hypothese H 1.1 a) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 1,8 % und ist somit kleiner als 5 %. Die einfließenden Effekte beschränken sich auf die Dimension Azimut und die abhängige Variable Wiedergabezeit. Sie sind beide groß.

H 1.1 b) *Der Leistungsvorteil konventioneller Anzeigen gegenüber dem Panoramaformat bleibt auch bei Erhöhung des Schwierigkeitsgrades der zu bearbeitenden Aufgabe bestehen.*

Tab. 5-4: Logiktablelle H 1.1 b)

Konfiguration				Wertung			
Vergleich Format	Abhängige Variable	Komponente	Objekt- anzahl	Objektanzahl (T-Tests)	Komp.-ebene (Log. UND)	Variablenebene (Log. ODER)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	Wiedergabe- fehler	Azimut	2	=	=	=	=
			4	=			
			6	=			
		Entfernung	2	=	=		
			4	=			
			6	=			
		Höhe	2	> (0,023 / o)	=		
			4	=			
			6	=			
	Wiedergabe- zeit	Azimut	2	> (0,056 / +) ¹¹ > (0,028 / +)	> (0,078) ¹³ > (0,051)	=	
			4	> (0,019 / o)			
			6	> (0,005 / +)			
		Entfernung	2	=	=		
			4	=			
			6	=			
		Höhe	2	< (0,044 / +)	< (0,075)		
			4	< (0,013 / +)			
			6	< (0,018 / o)			
PAN-EXO	Wiedergabe- fehler	Azimut	2	> (0,001 / +)	=	=	> (0,045)
			4	=			
			6	> (0,045 / +)			
		Entfernung	2	> (0,007 / +)	=		
			4	< (0,007 / +)			
			6	=			
		Höhe	2	< (0,001 / +)	=		
			4	=			
			6	=			
	Wiedergabe- zeit	Azimut	2	> (0,036 / o) ¹³ > (0,072 / o)	> (0,045) ¹³ > (0,080)	> (0,045)	
			4	> (0,002 / +)			
			6	> (0,007 / +)			
		Entfernung	2	=	=		
			4	=			
			6	> (0,028 / o)			
		Höhe	2	=	=		
			4	=			
			6	=			

PAN – 2D: Die Hypothese H 1.1 b) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht. Auf Komponentenebene existieren insgesamt zwei signifikante Unterschiede, die aufgrund ihrer gegensätzlichen Ausprägung als sich gegenseitig kompensierend betrachtet werden.

PAN – EXO: Die Hypothese H 1.1 b) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 4,5 % und ist somit kleiner als 5 %. Die einfließenden Effekte beschränken sich auf die Dimension Azimut und die abhängige Variable Wiedergabezeit. Sie sind alle mittelgroß und groß.

¹¹ Anpassung der durch Holm-Bonferroni korrigierten p-Werte zu Gunsten des Vergleichs mit der exozentrischen Ansicht und zu Lasten des Vergleichs mit der zweidimensionalen Ansicht, da letzterer Wert keinen Einfluss auf einer höheren Ebene hat (die Irrtumswahrscheinlichkeit auf Komponentenebene beträgt 5,1 % und ist somit größer als 5 %). Beide unangepassten p-Werte sind kleiner als 5 %. Der Konservatismus der Holm-Bonferroni Korrektur führt jedoch bei der Anpassung beider Werte zu einer Überschreitung dieses Limits. Daher kann die Aussage nur für einen Vergleich bestätigt werden. In grauer Farbe sind die ursprünglich korrigierten p-Werte dargestellt.

H 1.2) *Die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung ist bei konventionellen Anzeigen niedriger als bei dem Panoramaformat.*

Tab. 5-5: Logiktablelle H 1.2)

Konfiguration		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Modalität (T-Tests)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	GA	=	< (0,000)
	KA	< (0,043 / o)	
	ZA	< (0,012 / -)	
	AA	< (0,005 / o)	
	AN	< (0,030 / o)	
	FR	=	
PAN-EXO	GA	=	=
	KA	=	
	ZA	=	
	AA	=	
	AN	=	
	FR	=	

PAN – 2D: Die Hypothese H 1.2) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene wird zwar ein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht festgestellt. Dieser besteht jedoch zu Gunsten der Panoramaansicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 0 %, die eingehenden Effekte sind gering und mittelgroß.

PAN – EXO: Die Hypothese H 1.2) wird nicht bestätigt.

Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht.

H 1.3) *Die subjektive Einschätzung hinsichtlich des generierten erweiterten Raumbewusstseins ist bei konventionellen Anzeigen besser als bei dem Panoramaformat.*

Tab. 5-6: Logiktablelle H 1.3)

Konfiguration		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Modalität (T-Tests)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	BA	< (0,040 / o)	< (0,040)
	VA	-	
	VS	-	
PAN-EXO	BA	> (0,049 / o)	> (0,049)
	VA	-	
	VS	-	

PAN – 2D: Die Hypothese H 1.3) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene wird zwar ein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht festgestellt. Dieser besteht jedoch zu Gunsten der Panoramaansicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 4 %, der eingehende Effekt ist mittelgroß.

PAN – EXO: Die Hypothese H1.3) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 4,9 % und ist somit kleiner als 5 %. Der einfließende Effekt beschränkt sich auf die Modalität Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen. Er ist mittelgroß.

ZH 1) *Verglichen mit konventionellen Anzeigen wirkt sich das Panoramaformat bei der Generierung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich der Erfassung numerischer Werte von egozentrischen Objektrelationen nicht unterstützend aus.*

Tab. 5-7: Logiktable ZH 1)

Konfiguration			Wertung	
Vergleich Format	Art der Datenerhebung	Hypothesen	Status	ZH 1
PAN-2D	Objektiv	H 1.1)	Nicht bestätigt	Nicht bestätigt
		H 1.1 a)	Nicht bestätigt	
		H 1.1 b)	Nicht bestätigt	
	Subjektiv	H 1.2)	Nicht bestätigt	
		H 1.3)	Nicht bestätigt	
PAN-EXO	Objektiv	H 1.1)	Bestätigt	Bestätigt
		H 1.1 a)	Bestätigt	
		H 1.1 b)	Bestätigt	
	Subjektiv	H 1.2)	Nicht bestätigt	
		H 1.3)	Bestätigt	

PAN – 2D: Die Zentralhypothese ZH 1 wird nicht bestätigt.

Bezüglich des Vergleichs zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht muss die Zentralhypothese ZH 1 verworfen werden, da keine Einzelhypothese bestätigt wurde. Die Panoramaansicht und die zweidimensionale Ansicht sind zur Generierung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich der Erfassung exakter Objektpositionen gleichermaßen gut oder schlecht geeignet.

PAN – EXO: Die Zentralhypothese ZH 1 wird bestätigt.

Die Zentralhypothese ZH1 wird für den Vergleich zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht bestätigt, da sämtliche Hypothesen der objektiven Leistungsdaten bestätigt wurden. Sowohl für den Wiedergabefehler als auch für die Wiedergabegenauigkeit wurde ein Leistungsdefizit unter Verwendung der Panoramaansicht festgestellt (H 1.1). Für die Wiedergabezeit wurde zudem festgestellt, dass das Leistungsdefizit unabhängig von der Anzahl der zu beobachtenden Objekte und des gestellten Fragetyps bestehen bleibt (H 1.1 a, H 1.1 b). Ferner wird die Gültigkeit der Zentralhypothese durch die Bestätigung von H1.3), welche die subjektive Selbsteinschätzung des generierten Situationsbewusstseins thematisiert, untermauert. Einzig in der subjektiv wahrgenommenen Arbeitsbelastung, die durch die Hypothese H1.2) überprüft wurde, konnten keine Unterschiede zwischen beiden Ansichten ermittelt werden. Es lässt sich somit festhalten, dass die Panoramaansicht sich zur Generierung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich der Erfassung numerischer Werte von egozentrischen Objektrelationen weniger eignet als die exozentrische Ansicht.

6. Versuch 2: Evaluation der Konflikterkennung

Kapitel 4 und 5 beschreiben die Untersuchung von erweitertem Raumbewusstsein hinsichtlich der Erfassung numerischer Werte von egozentrischen Objektrelationen mit verschiedenen Raumformaten. Zur vollständigen Prüfung der in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen bedarf es jedoch eines zweiten Experimentes, das erweitertes Raumbewusstsein im Kontext der Konflikterkennung bzw. -prognose betrachtet. Der Fokus des zweiten Versuchs liegt daher ausschließlich auf dem Level 3 von Situationsbewusstsein, der Antizipationsebene. Analog zum ersten Experiment erfolgt die Leistungsbeurteilung wieder anhand einer vergleichenden Untersuchung. Gegenstand von Kapitel 6 ist die Beschreibung des Vorgehens zur Durchführung dieses zweiten Experiments. Es wird zunächst wieder die Untersuchungsmethodik beschrieben und das Vorgehen zur Erstellung der Versuchsszenarien erklärt. In dem Kapitel Beschreibung der Raumformate werden anschließend alle verwendeten Raumformate vorgestellt. Danach werden grundlegende Aspekte der Datenerfassung beschrieben. Zudem wird die bei der Untersuchung verwendete Soft- und Hardware vorgestellt. Den Abschluss bilden die Beschreibung des Versuchsablaufs und der Versuchsdurchführung.

6.1. Methodik zur Ermittlung von erweitertem Raumbewusstsein

Die Untersuchungsmethodik bei der Durchführung dieses Versuchs ähnelt der Vorgehensweise, die beim ersten Versuch gewählt wurde. Die Beurteilung des erweiterten Raumbewusstseins, das durch die Panoramaansicht generiert wird, erfolgt dabei wieder durch sowohl objektive Leistungsmessungen als auch durch subjektive Bewertungen. Dazu werden dynamische Szenarien mit sich frei und unabhängig voneinander bewegenden Objekten durch die Panoramaansicht visualisiert. Um die erzielte Leistung beurteilen zu können, wird diese mit der durch alternative Raumformate (Vgl. Kap. 6.3) erzielten Leistung verglichen.

Die primäre Aufgabe der Probanden besteht dieses Mal jedoch darin, Displaypositionen zweier Objekte in Relation zu betrachten und deren zukünftige Relativposition zu prognostizieren. Sie müssen dabei beurteilen, wie sich einzelne, punktförmige Objekte relativ zu einem Luftraum bewegen, der bezüglich der eigenen Position egozentrisch referenziert ist. Es muss möglichst schnell ermittelt werden, ob und welches Objekt in den Luftraum fliegt und somit einen Konflikt erzeugt. Sofern zwei Objekte in Frage kommen, ist stets das Objekt zu wählen, welches den Konflikt in zeitlicher Abfolge zuerst verursacht. Diese Aufgabe bedarf zwar des Verständnisses aktueller Objektpositionen und Objektgeschwindigkeiten, im Unterschied zum ersten Versuch erfordert sie jedoch nicht das Bewusstsein über exakte numerische Koordinaten. Des Weiteren beschränkt sich die Beurteilung des generierten Raumbewusstseins ausschließlich auf die Antizipationsebene.

Bei der Gestaltung der Szenarien werden taktische und strategische Aspekte wieder vernachlässigt. Die Untersuchungsszenarien sind stattdessen einfach gehalten. Details hierzu werden in Kapitel 6.2 erläutert.

Die Variation des Schwierigkeitsgrades erfolgt durch eine verschiedene Anzahl an zu beobachtenden Objekten sowie durch unterschiedliche Zeiträume, die bis zum Auftreten des Konfliktes verstreichen. Des Weiteren wird eine erhöhte Arbeitsbelastung durch die Einführung einer Zusatzaufgabe, die parallel zu der Hauptaufgabe zu bearbeiten ist, generiert. Haupt- und Zusatzaufgabe besitzen dabei dieselbe Priorität.

6.1.1. Leistungsmessung

Mit der Konflikterkennung wird im Rahmen dieses zweiten Versuches eine leistungsbasierte Methode zur Messung von Situationsbewusstsein angewandt, die bereits im Bereich von Air Traffic Control Untersuchungen verbreitet zum Einsatz kommt [161]. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, müssen die Probanden beurteilen, ob ein Flugobjekt zukünftig in einen definierten Luftraum fliegt, beziehungsweise das Objekt ermitteln, das diesen Schritt als erstes vollzieht. Die maximale Zeitspanne, in der die zu beurteilenden Szenarien präsentiert werden, ist auf 15 s limitiert, wobei die zum Ant-

worten verbleibende Zeit grafisch visualisiert wird. Des Weiteren wird die Darstellung sofort beendet, wenn ein Proband seine Schätzung eingegeben hat.

Die erzielte Leistung wird dabei durch die Fehlerrate bei der Konflikterkennung und die Schätzzeit operationalisiert. Die Fehlerrate ist definiert durch die Anzahl der fehlerhaften Schätzungen geteilt durch die Gesamtanzahl aller getätigten Schätzungen. Die Schätzzeit beschreibt jeweils die Zeitspanne zwischen Start der Darstellung des Szenarios und der getätigten Eingabe. Schätzzeiten werden jedoch nur dann als Leistungsvariable berücksichtigt, wenn der Konflikt korrekt erkannt oder abgewiesen wurde.

Ein wesentlicher Vorteil dieser leistungsbasierten Methode zur Ermittlung von Situationsbewusstsein besteht darin, dass Interferenzen mit Effekten, die aus der Beanspruchung des Gedächtnisses resultieren, ausgeschlossen werden können. Als Nachteil ist eine auf die Aufgabe stark fokussierte Aufmerksamkeit zu nennen, die Konsequenz der immer gleichen Abfrage ist.

6.1.2. Subjektiv erlebtes Raumbewusstsein

Wie bereits im ersten Versuch wird der SART als eine sinnvolle Ergänzung zur leistungsbasierten Messung von Situationsbewusstsein betrachtet. Die Anwendung erfolgt analog zum ersten Versuch, vgl. Kapitel 4.1.2.

6.1.3. Weitere Erhebungen

Neben dem Situationsbewusstsein werden im Rahmen der Untersuchung weitere Parameter erhoben. Dies betrifft zum einen die Arbeitsbelastung, die ein zusätzlicher, interessanter Indikator über die Qualität einer Darstellungsart ist. Gemessen wird die Arbeitsbelastung indirekt über eine Zusatzaufgabe, die parallel zur der Konflikterkennungsaufgabe zu bearbeiten ist. Insgesamt werden drei unterschiedliche Zusatzaufgaben dargeboten, die typische Nebenbelastungen im Cockpit repräsentieren und verschiedene Modalitäten des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses beanspruchen (Kap. 2.4.1). Ist der Erfüllungsgrad der Zusatzaufgabe hoch, wird davon ausgegangen, dass die Arbeitsbelastung durch die Hauptaufgabe in der jeweiligen Modalität niedrig ist und freie kognitive Ressourcen zur Bearbeitung der Zusatzaufgabe herangezogen werden.

Weitere Kenngrößen die erhoben werden sind Fragen des NASA TLX Fragebogens sowie eine Rangfolge, welche die subjektiv empfundene Eignung der einzelnen Raumformate für die spezielle Aufgabe widerspiegelt. Die einzelnen Fragen des NASA TLX sowie die Erhebungsmethodik sind dabei identisch zum ersten Versuch, siehe Kapitel 4.1.3. Ferner sind die Zusatzaufgaben entsprechend der subjektiv wahrgenommenen Schwierigkeit in eine Rangfolge zu überführen.

6.2. Erstellung der Versuchsszenarien

Wie bereits im ersten Versuch erfolgt die Erstellung der Versuchsszenarien automatisiert durch MATLAB-Skripte. Das Flugverhalten wird wieder stark vereinfacht mit einer realistischen Flugdynamik (Kap. 4.2) abgebildet. Taktische und strategische Aspekte werden nicht berücksichtigt.

Die Positionierung der einzelnen Objekte im dargestellten Raum erfolgt zufällig. Die maximale horizontale Entfernung zum eigenen Flugzeug ist auf 50 NM begrenzt, die Höhe ist auf einen Mindestwert von 5000 ft und einen Maximalwert von 60 000 ft limitiert. Um die eindeutige Lesbarkeit aller Objekte zu gewähren, halten diese zueinander stets einen horizontalen Mindestabstand von 1 NM oder einen vertikalen Mindestabstand von 500 ft zueinander ein.

Die eigene Flughöhe beträgt in allen Szenarien konstant 30 000 ft, die eigene Fluggeschwindigkeit konstant 1020 kn. Die eigene Flugbahn und die Flugbahnen anderer Objekte verlaufen geradlinig, die eigene Flugbahn ist zudem horizontal. Die Objektfluggeschwindigkeiten sind konstant und variieren zufällig gleichverteilt zwischen 600 kn und 1200 kn. Wertepaare, die außerhalb der in Diagr. 4-1 dargestellten Grenzen liegen, werden nicht berücksichtigt.

Die Objektrelativgeschwindigkeit gegenüber dem eigenen Flugzeug kann somit bis zu 2220 kn betragen. Die Objektvertikalgeschwindigkeiten variieren in einem Wertebereich von -10 000 ft/min bis +10 000 ft/min, wobei nur 20 % aller Objekte eine Vertikalgeschwindigkeit ungleich Null aufweisen. Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich Flugobjekte primär nur in horizontaler Richtung bewegen. Die relative Flugrichtung der Objekte wird durch den relativen Kurswinkel beschrieben, welchem Werte zwischen 0° und 360° zugewiesen werden.

Als Luftraum wird ein egozentrisch referenziertes Zylindersegment mit einem Öffnungswinkel von 180° und einem Radius von 30 NM gewählt. Dieses bewegt sich mit der eigenen Position mit und umfasst entweder die vordere oder die hintere Hemisphäre. In der vertikalen Dimension wird es durch die eigene Flughöhe begrenzt und erstreckt sich von dieser beginnend entweder nach unten bis zum Boden oder nach oben ins Unendliche, bzw. zum Displayrand. Die Auswahl der Form des Raumsegmentes begründet sich zum einen darin, dass es durch Zylinderkoordinaten beschrieben wird und derartige Segmente sowohl aus Sicht der Flugsicherheit als auch aus taktischer Sicht von großer Bedeutung sind. Des Weiteren kann die gewählte geometrische Form in allen drei Raumformaten eindeutig und vergleichbar dargestellt werden, was eine Grundvoraussetzung zur Generierung valider Versuchsergebnisse ist.

Neben der zufälligen Zuweisung numerischer Objektparameter wird durch den Erstellungsalgorithmus zudem sichergestellt, dass sich zu Beginn des Szenarios kein Objekt innerhalb oder in unmittelbarer Nähe des Raumsegmentes befindet. Des Weiteren dürfen Konflikte nur nach definierten Zeitspannen auftreten und müssen eindeutig erkennbar sein. Grenzfälle, die keine sichere Prognose erlauben, werden ausgeschlossen. Die Objektflugbahnen werden hierfür entsprechend angepasst. Details bezüglich der Generierung der Versuchsszenarien werden in Kuntz [162] beschrieben.

6.3. Beschreibung der Raumformate

Die im ersten Versuch verwendeten Raumformate und ihre grafischen Realisierungen werden als Grundlage für diesen Versuch genutzt. Zusätzlich zum heterozentrischen, perspektivischen Panoramaformat werden wieder das zweidimensionale, koplanare Format und das exozentrische, gebundene Format als Vergleichsgrundlage verwendet. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung sei daher auf die Kapitel 4.3, 4.3.1, 4.3.2 und 4.3.3 verwiesen. Die einzigen Unterschiede im Vergleich zur grafischen Umsetzung des ersten Versuches beziehen sich auf die Indikation der Vertikalgeschwindigkeit, die Darstellung des Zylinderraumsegmentes und die Anzeige der zum Antworten verbleibenden Zeit.

Die qualitative Indikation der Steig- und Sinkgeschwindigkeit erfolgt ansichtsübergreifend und einheitlich mit Hilfe von weißen Pfeilen, die sich vom Objektsymbol ausgehend nach oben oder nach unten erstrecken. Die Indikation gibt dabei lediglich Auskunft, ob das Objekt eine positive oder negative Vertikalgeschwindigkeit aufweist, sie erlaubt jedoch keinen Rückschluss über deren Betrag. Bei einem Horizontalflug erfolgt keine Indikation.

Mit Hilfe eines dynamischen Zeitbalkens am oberen Displayrand wird die zur Aufgabenbearbeitung verbleibende Zeit visualisiert. Dessen graue Füllung nimmt von links beginnend mit fortschreitender Zeit linear ab.

Die Darstellung des Zylinderraumsegmentes wird im Folgenden für die drei verschiedenen Raumformate beschrieben.

6.3.1. Zweidimensionales, koplanares Format

Innerhalb des zweidimensionalen, koplanaren Formats wird das Zylinderraumsegment sowohl in der linken Kartendarstellung als auch in der rechten, dem E-Scope Format ähnlichen, Darstellung visualisiert. Für das Kartenformat wird ein zur eigenen Position konzentrischer grüner Halbkreis mit transparenter grüner Füllung dargestellt.

Für die auf der rechten Seite dargestellte Abbildung fällt die Visualisierung hingegen vergleichsweise dezent aus, um die Vergleichbarkeit zu den anderen Raumformaten zu gewähren. Das Zylinderraumsegment wird hierbei lediglich durch zwei grüne linienförmige Eckmarkierungen auf der eigenen Flughöhe dargestellt. In der Horizontalebene begrenzen die beiden Markierungen den relevanten horizontalen Entfernungsbereich. Die vertikale Orientierung der Markierungen gibt an, ob sich das relevante Zylinderraumsegment ausgehend von der eigenen Flughöhe nach oben oder nach unten erstreckt.

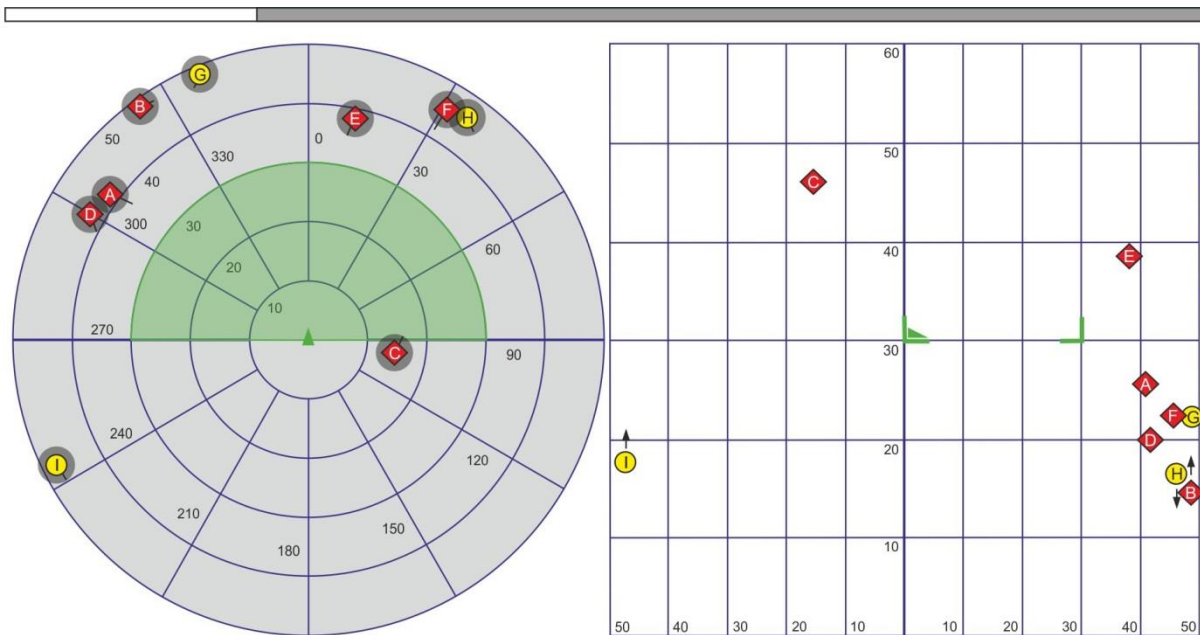


Abb. 6-1: Zweidimensionales, koplanares Format - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)

6.3.2. Exozentrisches, gebundenes Format

Ähnlich dem zweidimensionalen, koplanaren Format erfolgt beim exozentrischen, gebundenen Format die Darstellung der horizontalen Abmessungen des Zylinderraumsegments durch einen zur eigenen Position konzentrischen Halbkreis. Dieser ist auf der Referenzebene positioniert und besitzt eine grüne Linienumrandung sowie eine transparente grüne Füllung. Aufgrund der gewählten schiefwinkligen Parallelprojektion erscheint er in der Abbildung als Halbellipse.

Die vertikale Ausrichtung des Zylinderraumsegmentes wird an den einzelnen Objektloten durch grüne Klammern in Höhe der eigenen Flughöhe visualisiert. Die Richtung der Öffnung der Klammer indiziert, ob sich das relevante Zylinderraumsegment ausgehend von der eigenen Flughöhe nach oben oder nach unten erstreckt.

Auf eine integrierte Darstellung des Zylinderraumsegmentes, beispielsweise in Form eines Drahtmodells, wird bewusst verzichtet, um die Vergleichbarkeit zwischen den Raumformaten zu gewährleisten.

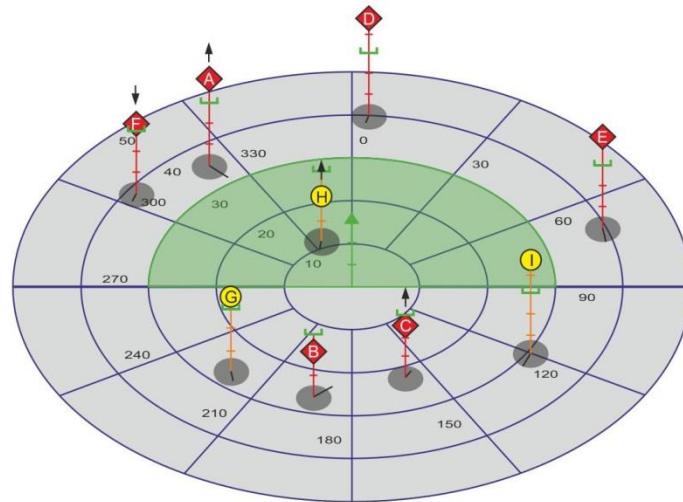


Abb.: 6-2 Exozentrisches, gebundenes Format - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)

6.3.3. Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat

Die horizontalen Abmessungen des Zylinderraumsegmentes werden auch beim heterozentrischen, perspektivischen Panorama auf der Referenzebene dargestellt. Der konzentrische Halbkreis erscheint in der Abbildung dabei als Rechteck. Dieses wird wieder durch eine grüne Linienumrandung und eine transparente grüne Füllung grafisch hervorgehoben.

Mit Hilfe grüner linienförmiger Eckmarkierung erfolgt die Indikation der vertikalen Ausrichtung des Zylinderraumsegmentes. Die Marker befinden sich auf der eigenen Höhe und begrenzen in der Horizontaldimension den relevanten azimutalen Bereich. Die vertikale Orientierung der Markierungen gibt an, ob sich das relevante Zylinderraumsegment ausgehend von der eigenen Flughöhe nach oben oder nach unten erstreckt.

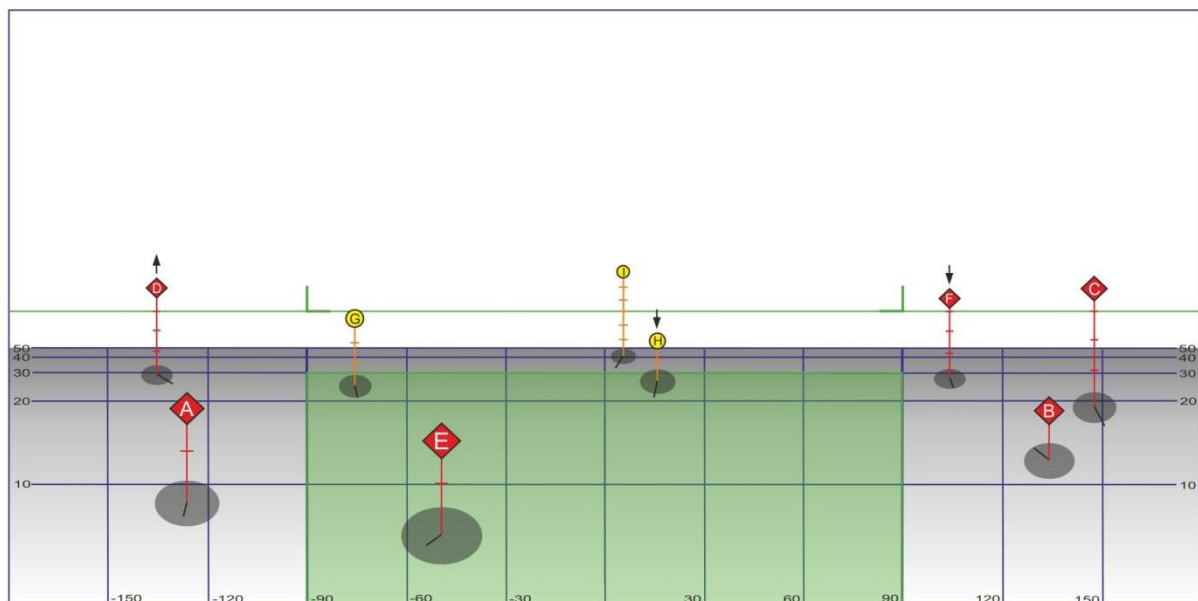


Abb. 6-3: Heterozentrisches, perspektivisches Panoramaformat - Zylinderraumsegment, vordere Hemisphäre, oberhalb der eigenen Flughöhe (kontrastoptimierte Abbildung)

6.4. Auswahl und Beschreibung der Zusatzaufgaben

Zweck der Zusatzaufgaben ist es, während des Versuchs die verbleibenden freien visuellen und kognitiven Kapazitäten zu binden. Sie müssen daher parallel zur Hauptaufgabe bearbeitet werden. Über die in der Zusatzaufgabe erzielte Leistung ist es schließlich möglich, die in der Hauptaufgabe induzierte Arbeitsbelastung objektiv zu beurteilen [152].

Die Darbietung erfolgt innerhalb einer fest definierten Taktung. Das heißt, die Zeitintervalle zwischen einzelnen Aufgaben sind fix. Je schneller also die Antwort auf eine Zusatzaufgabe erfolgt, desto größer ist die danach verbleibende Pause. Durch ein auditives Signal wird der Proband schließlich darauf hingewiesen, dass eine neue Zusatzaufgabe begonnen hat. Mit Beendigung eines Durchlaufs der Hauptaufgabe endet auch die Darbietung der Zusatzaufgabe.

Die Grundlage zur Auswahl der einzelnen Aufgabentypen bildet eine von Kostka [62] durchgeführte Arbeitsbelastungsprofilanalyse von Piloten hochagiler Flugzeuge. Im Rahmen einer Befragung werden dazu die wichtigsten perzeptuellen und kognitiven Modalitäten, die im operativen Flugbetrieb beansprucht werden, hinsichtlich ihres Einflusses auf die erzeugte Gesamtarbeitsbelastung bewertet. Bei den perzeptuellen Modalitäten werden die visuelle und die auditive Wahrnehmung untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass die Belastung durch die auditive Wahrnehmung im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung nur sehr gering ist. Bei der Auswahl der Zusatzaufgaben findet die auditive Wahrnehmung daher keine Berücksichtigung.

Die von Kostka untersuchten kognitiven Modalitäten umfassen mit dem Abruf von Informationselementen und der der kognitiven Manipulation zwei Komponenten der Verständnisebene von Situationsbewusstsein (Kap. 2.4.4) und mit der Antizipation zukünftiger Informationselemente eine Komponente der Antizipationsebene. Alle drei Komponenten erzeugen eine vergleichsweise hohe Arbeitsbelastung, wobei der höchste Wert bei der Antizipation zukünftiger Informationselemente festzustellen ist. Da die Antizipation zukünftiger Informationselemente in Form der Konfliktprediktion bereits durch die Hauptaufgabe abgedeckt wird, werden nur die beiden anderen Komponenten der kognitiven Modalität durch Zusatzaufgaben abgebildet.

Es verbleiben somit die folgenden drei Modalitäten, die bei der Auswahl der Zusatzaufgabe zu berücksichtigen sind:

- Visuelle Wahrnehmung (Wahrnehmungsebene)
- Abruf von Informationselementen (Verständnisebene)
- Kognitive Manipulation (Verständnisebene)

Um eine möglichst differenzierte Auswertung zu gewährleisten, soll, soweit möglich, jeder Modalität genau eine Zusatzaufgabe zugeordnet werden.

6.4.1. Visuelle Wahrnehmung

Die Arbeitsbelastung in der Modalität der visuellen Wahrnehmung wird durch eine visuelle Suchaufgabe (VS) generiert (Gawron [152], Detection Secondary Task). Dabei wird den Probanden ein Muster aus grünen und roten Balken präsentiert. Gleichfarbige Balken sind stets gleich orientiert. Die Gruppen der grünen und roten Balken weisen jedoch stets eine gegensätzliche Orientierung auf. Die Positionierung einzelner Balken erfolgt zufällig innerhalb einer 6 x 6 Matrix. Dabei werden nur 17 der 36 Felder durch einen Balken belegt.

Bei 50 % der erzeugten Bilder wird nun zufällig ein Balken der roten oder grünen Gruppe gewählt und dessen Orientierung derart manipuliert, dass sie der jeweils anderen Farbgruppe entspricht. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, möglichst schnell zu beurteilen, ob die Orientierung aller Balken im dargestellten Bild gruppenkonform ist oder nicht. Abb. 6-4 zeigt ein Beispiel einer gruppenkonformen Konfiguration und Abb. 6-5 eine Konfiguration mit einem Abweichler.

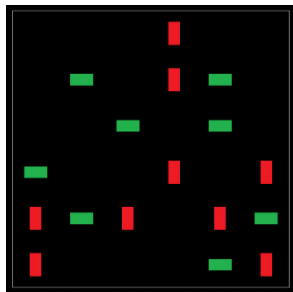


Abb. 6-4: Gruppenkonforme Konfiguration

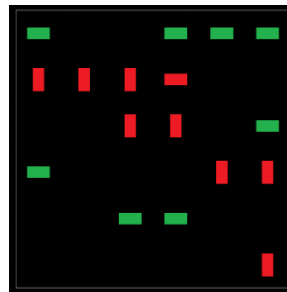


Abb. 6-5: Konfiguration mit Abweichler

6.4.2. Abruf von Informationselementen

Eine isolierte Abbildung kognitiver Prozesse unabhängig von perzeptuellen Vorgängen ist nicht möglich. Kognition, die im Rahmen eines Experimentes von „außen“ gesteuert wird, erfordert immer auch Perzeption (Kap. 2.4.1). Für die beiden Zusatzaufgaben, die kognitive Modalitäten beanspruchen sollen, werden Konzepte angewandt, bei denen die Informationsaufnahme jeweils durch visuelle Wahrnehmung erfolgt.

Für den Abruf von Informationselementen wird dabei auf eine Gedächtnisaufgabe zurückgegriffen, bei der die Probanden entscheiden sollen, ob innerhalb einer visuell dargebotenen Ziffernfolge eine von zwei einzuprägenden Zahlen enthalten ist (Gawron [152], Memory Scanning Task). Zu Beginn eines jeden Durchlaufs dieser sogenannten visuellen Gedächtnisaufgabe (VG) werden dazu für 3 Sekunden 2 zweistellige Zahlen auf einem Bildschirm zum Einprägen dargestellt. Anschließend erscheinen achtstellige Ziffernfolgen, die mit einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit eine der beiden interessierenden Zahlen enthalten. Die Probanden müssen nun schnellstmöglich entscheiden, ob die jeweils dargestellte Ziffernfolge eine der beiden Zahlen beinhaltet.

Ein Beispiel ist in Abb. 6-6 gegeben. Die einzuprägenden Zahlen sind die 54 und die 98. Während die in der Bildmitte dargestellte Ziffernfolge die 98 enthält, ist keine der beiden Zahlen in der rechts dargestellten Ziffernfolge enthalten.



Abb. 6-6: Darstellung der visuellen Gedächtnisaufgabe

6.4.3. Kognitive Manipulation

Analog zum Abruf von Informationselementen wird für die Zusatzaufgabe zur kognitiven Manipulation ein Konzept angewandt, bei dem die Informationsaufnahme durch visuelle Wahrnehmung erfolgt.

Die kognitive Manipulation wird durch eine sogenannte mentale Rotationsaufgabe (MR) abgebildet [163]. Dabei werden den Probanden simultan zwei Bilder präsentiert, die dreidimensionale Volumenkörper, bestehend aus aneinander gereihten, weißen und grauen Würfeln, aus verschiedenen Blickwinkeln zeigen [164]. Der Blickwinkel ist dabei stets so gewählt, dass alle räumlichen Abmessungen des Körpers sichtbar sind. Der Unterschied der Blickwinkel zwischen rechter und linker Abbildung beträgt mindestens 30° und höchstens 150°.

Der dargestellte Körper ist zu 50 % aller Fälle auf der rechten und linken Seite identisch. In den verbleibenden 50% der Fälle weisen die dargestellten Körper leichte Unterschiede in der Anordnung der einzelnen Würfelsegmente auf. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, schnellstmöglich zu beurteilen, ob die dargestellten Körper identisch sind oder nicht.

Abb. 6-7 zeigt auf ein Beispiel für identische Körper. Die in Abb. 6-8 dargestellten Körper weisen hingegen kleine Unterschiede in der Anordnung ihrer Würfelsegmente auf.

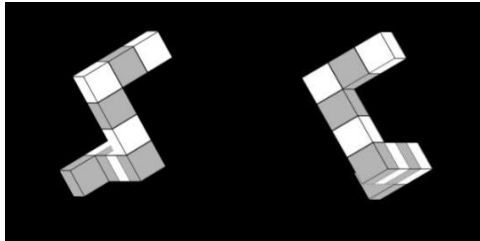


Abb. 6-7: Identische Volumenkörper [164]

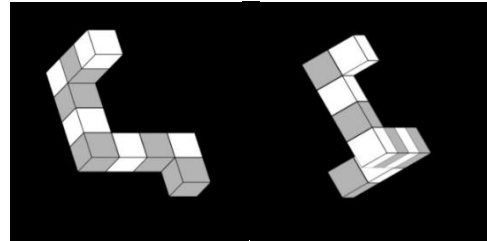


Abb. 6-8: Verschiedene Volumenkörper [164]

6.5. Datenerhebung

Wie in Kapitel 6.1.1 beschrieben, wird die Leistung der Hauptaufgabe durch die Fehlerrate und die Schätzzeit operationalisiert. Die Fehlerrate entspricht dem Verhältnis der fehlerhaften zu der Gesamtanzahl aller getätigten Antworten. Nicht zeitgerecht getätigte Antworten werden dabei auch als fehlerhafte Antworten gewertet.

Die Schätzzeit ist die Zeit zwischen Beginn der Darbietung eines Szenarios und der Eingabe der Konfliktschätzung. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, möglichst schnell eine korrekte Schätzung abzugeben. Die Richtigkeit der Antwort ist dabei deutlich höher gewichtet als die Schätzzeit. Aus diesem Grund wird die Schätzzeit nur im Falle einer korrekten Schätzung berücksichtigt. Bei falschen Schätzungen wird sie zwar mit erhoben, in der sich anschließenden Analyse jedoch ausgeklammert.

Neben den Leistungsmaßen der Hauptaufgabe wird mit der Fehlerrate auch ein Leistungsmaß der Zusatzaufgabe erhoben. Analog zur Fehlerrate der Hauptaufgabe entspricht die Fehlerrate der Zusatzaufgabe dem Verhältnis der fehlerhaften Antworten zu der Gesamtanzahl aller Antworten. Ausgelassene Antworten werden ebenfalls als Fehler gewertet. Die Gesamtanzahl der Antworten ist bei der Zusatzaufgabe jedoch variabel, da sie direkt von den Schätzzeiten bei der Bearbeitung der Hauptaufgabe abhängt.

6.6. Versuchsplan

Um die in 3.5 verfassten Hypothesen des zweiten Hauptversuchs in einem einzigen Experiment zu prüfen, bedarf es wieder eines mehrfaktoriellen Versuchsplans. Neben dem Raumformat werden die Schwierigkeit der Hauptaufgabe und die Art der Zusatzaufgabe als unabhängige Variablen gewählt. Der Versuchsplan besitzt somit drei Hauptfaktorstufen, die alle blockweise variiert werden (Tab. 6-1).

Zusätzlich zu den Hauptfaktoren wird mit der Konfliktnzahl ein weiterer Faktor variiert. Dieser trägt jedoch nicht zur Prüfung der verfassten Hypothesen bei und besitzt aufgrund des explorativen Ansatzes eine untergeordnete Rolle. Im Gegensatz zu den Hauptfaktoren wird er mit jedem neuen Szenario variiert.

Der Faktor Raumformat wird, wie auch im ersten Hauptversuch, blockweise untersucht. Er besitzt drei verschiedene Ausprägungen: koplanar und zweidimensional, exozentrisch und gebunden, oder heterozentrisch und panoramaartig. Die Blocksequenzen werden für verschiedene Probanden zufällig permutiert. Effekte, die aus der Sequenznummer resultieren, wie beispielsweise die zunehmende Müdigkeit der Probanden mit fortschreitender Versuchsdauer, werden so über die gesamte Stichprobe ausgeglichen.

Versuch 2: Evaluation der Konflikterkennung

Innerhalb des Blockes Raumformat werden die Hauptfaktoren Schwierigkeit der Hauptaufgabe und Art der Zusatzaufgabe variiert. Auch die sich aus diesen beiden Hauptfaktoren ergebenden Subblöcke werden in einer zufälligen Reihenfolge dargeboten.

Der Schwierigkeitsgrad wird einerseits durch eine unterschiedliche Anzahl an zu beobachtenden Objekten und andererseits durch eine unterschiedliche Zeitspanne, in welcher es zukünftig zum Konflikt kommen kann, variiert. Bei einer einfachen Hauptaufgabe betragen die Anzahl der zu beobachtenden Zielobjekte sechs und die Zeitspanne, nach der der Konflikt auftritt, 30 s. Für die schwierige Hauptaufgabe betragen die Anzahl der zu beobachtenden Zielobjekte acht und die Konfliktzeitspanne 60 s. Zusätzlich zu den Zielobjekten werden sowohl bei der einfachen als auch bei der schwierigen Hauptaufgabe stets drei Distraktoren dargestellt.

Die zu bearbeitenden Zusatzaufgaben wurden ausführlich in Kapitel 6.4 beschrieben. Diese umfassen die Modalitäten visuelle Wahrnehmung, Abruf von Informationselementen und kognitive Manipulation. Abgebildet werden sie durch eine visuelle Suchaufgabe, durch eine visuelle Gedächtnisaufgabe und durch eine mentale Rotationsaufgabe. Des Weiteren wird eine vierte Option im Versuchsplan berücksichtigt, bei der die Hauptaufgabe ohne Zusatzaufgabe zu bearbeiten ist.

Aus den drei Hauptfaktoren ergeben sich insgesamt 24 Faktorstufen, die im Rahmen dieses Versuchs untersucht werden. Jeder Hauptfaktorstufenkombination werden insgesamt 16 verschiedene Szenarien zugewiesen, woraus sich pro Versuchsperson für die Leistungsmessung der Hauptaufgabe insgesamt 384 Messpunkte ergeben.

Der Faktor Konfliktanzahl variiert zwischen keinem Konflikt, einem Konflikt und zwei Konflikten im Verhältnis 2:3:3.

Der NASA TLX und der SART Fragebogen werden für jede Hauptfaktorstufenkombination nur einmal erfasst, das Bilden der subjektiven Rangfolgen erfolgt einmalig zum Abschluss des gesamten Versuchs.

Tab. 6-1: Versuchsplan 2. Versuch

HF 1: Raumformat (Block)	2D								EXO								PAN							
HF 2: Schwierigkeit (Subblock)	E				S				E				S				E				S			
HF 3: Zusatzaufgabe (Subblock)	-	MR	VS	VG	-	MR	VS	VG	-	MR	VS	VG	-	MR	VS	VG	-	MR	VS	VG	-	MR	VS	VG
Anzahl der Messpunkte	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

	Hauptfaktorstufe		
Faktor: Konfliktanzahl	0	1	2
Anzahl der Messpunkte	4	6	6

2D - zweidimensionale, koplanare Ansicht

EXO - exozentrische, gebundene Ansicht

PAN - heterozentrische Panoramaansicht

E - Einfache Hauptaufgabe

S - Schwierige Hauptaufgabe

MR - Mentale Rotationsaufgabe

VS - Visuelle Suchaufgabe

VG - Visuelle Gedächtnisaufgabe

6.7. Versuchsumgebung

Der Versuch wurde analog dem ersten Versuch im klimatisierten Human Factors Engineering Labor von Airbus Defence and Space durchgeführt. Als Träger des Großflächendisplays diente dabei wieder das abteilungseigene Cockpit Mock-Up. Details dazu sind Kapitel 4.6 zu entnehmen.

6.7.1. Versuchshardware

Als primäres Anzeigemedium dient auch in diesem Versuch das 30 Zoll große Flüssigkristalldisplay (Kap. 4.6.1). Dieser Hauptbildschirm wird analog zum ersten Versuch zur Visualisierung der Szenarien der Hauptaufgabe verwendet.

Ein zusätzliches Flüssigkristalldisplay der Firma Fujitsu-Siemens wird zur Darstellung der Zusatzaufgabe im Head Up Bereich direkt oberhalb des primären Displays positioniert. Es besitzt eine Bildschirmdiagonale von 18 Zoll und eine Auflösung von 1280 mal 1024 Pixel.

Die Eingabe der Antworten der Hauptaufgabe erfolgt durch ein konventionelles Numpad, das für ein zügiges Eintippen der Buchstaben A-H modifiziert wurde (Abb. 6-9). Die Anordnung der acht Buchstaben erfolgt in zwei vierstelligen Reihen in alphabetischer Reihenfolge, oben links beginnend. Die einzelnen Buchstaben repräsentieren Objektkennzeichnungen, die im Falle eines detektierten Konfliktes zu selektieren sind. Durch eine in der unteren linken Ecke positionierte No-Taste werden Szenarien, in denen kein Konflikt detektiert wurde, abgewiesen.

Mit einer PC Mouse (Abb. 6-10) erfolgt die Eingabe der Antworten der Zusatzaufgabe. Da es in allen drei Zusatzaufgaben nur zwei Antwortoptionen gibt, wird die Antworteingabe auf die linke und die rechte Mouse-Taste beschränkt. Mit der linken Mouse Taste erfolgt bei der visuellen Suchaufgabe die Kennzeichnung von Konfigurationen mit Abweichlern, bei der visuellen Gedächtnisaufgabe die Kennzeichnung von Ziffernfolgen mit der Zielzahl und bei der mentalen Rotationsaufgabe die Kennzeichnung zweier nicht-identischer Volumenkörper.

Die Fragebögen zur Erhebung der subjektiven Daten werden über das 30 Zoll große Hauptdisplay dargeboten. Als Eingabemedium zur Erfassung der Antworten dient dabei der in Kapitel 4.6.1 beschriebene IR Touchscreen.

Der Versuchsrechner zur Wiedergabe der notwendigen Anwendungen ist ein Terra PC mit vier Intel i7 Prozessoren und 16 GB Arbeitsspeicher. Das operierende Betriebssystem ist Windows XP.



Abb. 6-9: Modifiziertes Numpad
[eigene Bildquelle]



Abb. 6-10: Konventionelle PC Mouse
[eigene Bildquelle]

6.7.2. Versuchssoftware und Datentypen

Die Anwendung zur Versuchsdurchführung wird, wie bereits im ersten Versuch, mit VAPS XT 3.1.2 (Kap. 4.6.2) generiert. Die modellierten Funktionalitäten sind dabei im Wesentlichen wieder dieselben. Kleine Modifikationen der bestehenden Datei sind lediglich im Hinblick auf die Schnittstelle zum Numpad sowie die Bereitstellung der Fragebögen und des Zeitbalkens nötig.

Die Kommunikation mit der Programmdatei erfolgt bei einfachen Benutzereingaben, wie dem Starten oder Fortsetzen des Versuchs, über eine grafische Benutzerschnittstelle (GUI). Komplexere Eingaben werden über txt-Dateien getätigt, die unter Verwendung eines Parsers eingelesen werden. Dies betrifft zum einen die in MATLAB generierten Szenariendateien, die zunächst als Matfile gespeichert werden und eine Konvertierung in txt-Dateien erfordern. Sie enthalten Informationen über die Szenarienummer, die Simulationsdauer, die Anzahl der dargestellten Objekte und Distraktoren und die Identifier der konfliktverursachenden Kontakte. Zum anderen betrifft dies die Konfigurationsdatei, die für jeden Probanden vor dem Versuchsdurchlauf anzupassen ist. Sie beinhaltet die Reihenfolge, in der die einzelnen Szenarien während des Versuchs wiedergegeben werden, das Raumformat, mit der sie zu visualisieren sind, Informationen über den Typ der zu bearbeitenden Zusatzaufgabe, wichtige Szenarioparameter und einen Identifier des teilnehmenden Probanden.

Alle erhobenen Leistungsdaten werden für jede Hauptfaktorstufenkombination in txt-Dateien gespeichert. Diese beinhaltet neben den Numpad-Eingaben und den zugehörigen Eingabezeiten auch wichtige Szenarien- und Konfigurationsparameter. Die Ergebnisse der Fragebögen werden in separaten txt-Dateien hinterlegt. Anschließend werden sämtliche Protokolldateien mit Hilfe eines MATLAB-Skriptes im Rahmen einer Vorverarbeitung automatisiert eingelesen, zusammengefasst und in eine csv-Datei konvertiert.

Die Funktionalitäten zur Bearbeitung der Zusatzaufgabe werden durch Paradigm [165] bereitgestellt. Diese umfassen das Einlesen von Bild- und Konfigurationsdateien, die Ablaufsteuerung, die Visualisierung und die Speicherung von Eingabedaten. Sämtliche Eingabedaten der Zusatzaufgabe werden wieder für jede Hauptfaktorstufenkombination in eine txt-Datei gespeichert. Durch einen weiteren Vorverarbeitungsprozess werden die Inhalte der txt-Dateien zusammengefasst und in die bestehende csv-Ergebnisdatei kopiert. Abschließend erfolgt die statistische Analyse unter Verwendung der Statistik und Analyse-Software SPSS.

Der Zusammenhang zwischen den beschriebenen Prozessen ist in Abb. 6-11 in Form eines Informationsflussdiagramms für die drei Phasen Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung visualisiert. Komponenten der Hauptaufgabe sind auf der linken, Komponenten der Zusatzaufgabe auf der rechten Seite dargestellt. Grüne Kästchen repräsentieren Hardwarekomponenten, gelbe Kästchen Softwarefunktionalitäten und weiße Kästchen Dateien. Die Darstellung des gerichteten Informationsflusses zwischen verschiedenen Kästchen erfolgt durch Pfeile.

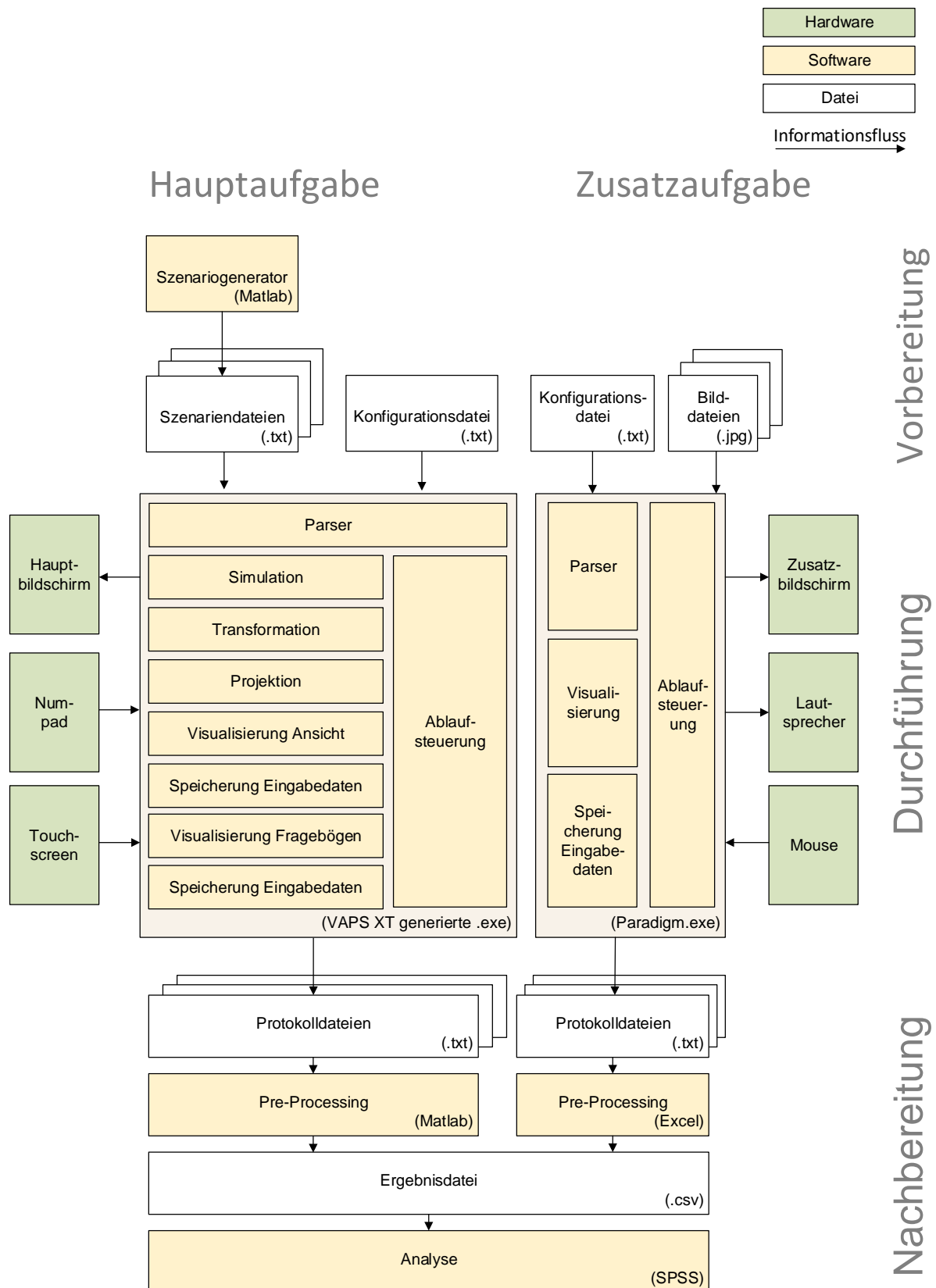


Abb. 6-11: Informationsflussdiagramm

6.8. Versuchsablauf

Der Versuch wird entsprechend der Ausprägungen des Faktors Raumformat in drei Blöcke unterteilt. Diese bestehen wiederum aus jeweils 24 einzelnen Subblöcken. Ein Subblock einer Hauptfaktorstufe beschreibt eine Szenariosequenz bestehend aus insgesamt 16 Szenarien, wobei jedes Szenario genau einer Aufgabe entspricht. Um während des Versuchs eine mentale Regeneration der Probanden zu ermöglichen, werden zwischen den Blöcken mehrminütige Pausen eingehalten.

Zu Beginn des Experiments erhalten die Probanden Gelegenheit, Eingaben über das Numpad zu trainieren. Als Ziel wird ein Bedienprozess verfolgt, bei dem der Blick auf dem Monitor verweilen kann. Die Buchstaben A-H, die von den Probanden möglichst schnell zu selektieren sind, werden in dem Übungsdurchlauf in zufälliger Sequenz auf dem Monitor dargestellt. Nach erfolgter Eingabe wird über den Hauptbildschirm visuelles Feedback über die Korrektheit der Auswahl vermittelt.

Des Weiteren bekommen die Probanden Gelegenheit, die drei Zusatzaufgaben zu trainieren. Sie werden dazu separat, das heißt ohne Hauptaufgabe, bearbeitet. Der Proband wird am Ende des Trainings über die erzielte Fehlerquote verbal informiert. Anschließend wird die erzielte Leistung der Zusatzaufgabe ohne Hauptaufgabe als Vergleichsmessung ermittelt.

Die Hauptaufgabe unter Verwendung der verschiedenen Raumformate wird zu Beginn eines jeden Versuchsblocks trainiert. Über die Qualität ihrer Antwort werden die Probanden in Form eines unmittelbaren visuellen Feedback informiert. Der konfliktverursachende Kontakt wird dabei farblich hervorgehoben und das Szenario wird bis zum Sichtbarwerden des Konfliktes in erhöhter Geschwindigkeit wiedergegeben.

Abb. 6-12 visualisiert die sequentielle Abfolge der Haupt- und Zusatzaufgabe. Bei der Hauptaufgabe beginnt sie mit einem statischen, weißen Bild, das für die Dauer von 0,5 s eingeblendet wird. Auf dem Bild ist mittig ein schwarzes Kreuz abgebildet, welches wieder den Blick und somit die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen vor jedem Durchlauf auf den Hauptbildschirm lenken soll. Anschließend beginnt die Wiedergabe der Versuchsszenarien. Diese werden solange eingeblendet, bis eine Eingabe über das Numpad erfolgt, maximal jedoch 15 s. Danach erscheint wieder das statische weiße Bild mit schwarzem Kreuz, bevor das nächste Szenario wiedergegeben wird.

Zeitgleich mit der Hauptaufgabe wird auch die Software zur Bearbeitung der Zusatzaufgabe gestartet. Bevor die erste Zusatzaufgabe auf dem Zusatzbildschirm erscheint, wird für die Dauer von 2 s ein Leerbild präsentiert. Sämtliche Zusatzaufgaben werden jeweils exakt 3 s dargestellt. Innerhalb dieser Zeit ist auch die Antworteingabe über die Mouse zu tätigen. Nach dem Ablauf der 3 s dauernden Bearbeitungszeit beginnt eine zweisekündige Pause, in der wieder das Leerbild dargestellt wird. Anschließend erscheint eine neue Zusatzaufgabe auf dem Display. Um die Aufmerksamkeit der Probanden auf das Erscheinen neuer Zusatzaufgaben zu lenken, wird dieser Prozess stets mit einem kurzen akustischen Signal begleitet.

Nach Beendigung eines Subblocks beziehungsweise einer Szenariosequenz, werden den Probanden der SART und der NASA TLX Fragebogen auf dem Display dargeboten. Die Eingabe der Antworten erfolgt über den Touchscreen. Die Fragebögen zur Bildung einer bevorzugten Rangfolge der Raumformate und zur Beurteilung der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe werden nach Beendigung der vollständigen Untersuchung ausgefüllt.

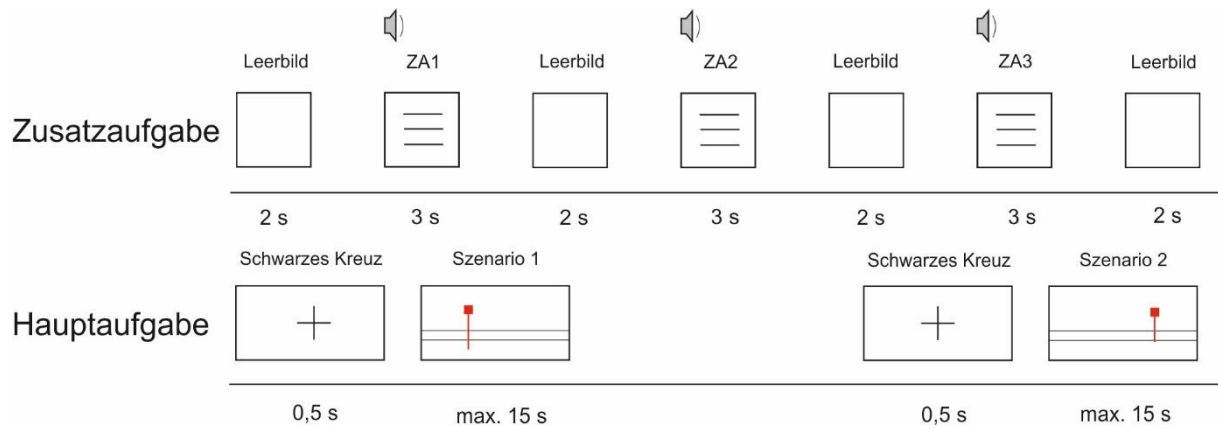


Abb. 6-12: Versuchsablaufplan

6.9. Auswahl der Versuchsteilnehmer

Für die Auswahl der Versuchsteilnehmer gelten exakt dieselben Kriterien wie im ersten Versuch. Diese werden in Kapitel 4.8 ausführlich beschrieben.

6.10. Durchführung

Zu Beginn des Versuchs erhielt jeder Proband Instruktionen über den geplanten Ablauf. Die drei verschiedenen Raumformate, die zu bearbeitende Hauptaufgabe, die drei Zusatzaufgaben, die Eingabemedien und die auszufüllenden Fragebögen wurden detailliert erläutert. Dabei aufkommende Fragen wurden beantwortet. Alle teilnehmenden Versuchspersonen wurden zudem über die Freiwilligkeit der Teilnahme und die Möglichkeit, den Versuch jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen zu können, belehrt. Zusätzlich wurden die Probanden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, in dem personenbezogene Daten wie Alter, absolvierte Flugstunden und geflogene Flugzeugmuster anzugeben waren.

In den Pausen zwischen einzelnen Blöcken wurden Getränke und Snacks gereicht. Des Weiteren wurde die Zeit für den Dialog mit den Probanden genutzt. Es lässt sich festhalten, dass alle Piloten und WSOs auch an dem zweiten Versuch sehr interessiert teilnahmen und wertvolle Anmerkungen und Hinweise über die Darstellungsarten und die Versuchsgestaltung gaben.

Der Versuch dauerte pro Person zwischen 5 und 6 Stunden. Keiner der Probanden hat den Versuch vor Beendigung aller drei Blöcke abgebrochen.

7. Versuch 2: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung

Dieses Kapitel beinhaltet die Auswertung und Interpretation der im zweiten Versuch erhobenen Messdaten. Nach einer Beschreibung der Stichprobe wird die Vorgehensweise zur statistischen Datenanalyse erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt, interpretiert und diskutiert. Darauf basierend werden letztlich die in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen überprüft.

7.1. Beschreibung der Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt 25 männliche Probanden teil, deren Altersspektrum sich von 27 bis 57 Jahren erstreckte. Das mittlere Alter betrug 44,7 Jahre ($SD = 9,3$ Jahre), die durchschnittliche Fluggerfahrung 2870 h ($SD = 1662$). 16 der 25 Probanden waren Piloten, die verbleibenden 9 Probanden waren Waffensystemoffiziere. Als geflogene Flugzeugmuster wurden der Tornado PA200, die Phantom F4, der Starfighter F104, der Eurofighter EF2000 und die Transall C160 genannt.

7.2. Datenanalyse

Im Rahmen dieses Versuchs wird erweitertes Raumbewusstsein durch die Fehlerrate bei der Konflikterkennung und die für korrekte Schätzungen benötigte Zeit operationalisiert. Durch eine Zusatzaufgabe wird zusätzlich zum erweiterten Raumbewusstsein die Arbeitsbelastung der Probanden erfasst. Eine Operationalisierung dieser erfolgt durch die in der Zusatzaufgabe erzielte Fehlerrate.

Zur Überprüfung der in Kapitel 3.5 verfassten Hypothesen werden die ermittelten Kenngrößen der Haupt- und Zusatzaufgabe hinsichtlich signifikanter Unterschiede zwischen einzelnen Ausprägungen eines Faktors oder einer Faktorstufenkombination analysiert. Dies geschieht wieder durch Paarvergleiche, bei denen die Methodik des T-Tests zur Anwendung kommt. Der Problematik der Alphafehlerkumulierung bei mehreren Paarvergleichen innerhalb einer Faktorstufe wird durch die Holm-Bonferroni-Korrektur begegnet.

7.3. Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt mit denselben statistischen Methoden, die bereits bei der Auswertung des ersten Versuchs Anwendung finden. Die Balken der dargestellten Diagramme visualisieren Mittelwerte. Abweichungen von diesen werden in Form des Standardfehlers dargestellt. Da die Probandenanzahl im zweiten Versuch mehr als doppelt so groß war wie im ersten Versuch, fallen die Standardfehler im Schnitt deutlich niedriger aus. Die zugehörigen exakten numerischen Werte sind im Anhang E – Ergebnistabellen in tabellarischer Form abgebildet.

Unterhalb der Balkendiagramme werden wieder für Paarvergleiche, bei denen der T-Test einen signifikanten Unterschied ergibt, relevante Prüfgrößen dieser statistischen Methode aufgeführt. Diese umfassen die Teststatistik T , die Irrtumswahrscheinlichkeit p , bzw. $p_{\text{adjustiert}}$ und die Effektstärke Cohen's d . Der Betrag der Effektgröße Cohen's d beschreibt für Werte um 0,2 einen kleinen (-), für Werte um 0,5 einen mittelgroßen (o) und für Werte um 0,8 einen großen (+) Effekt [160].

7.3.1. Datenmenge und Datenintegrität

Die Menge der erfassbaren objektiven Leistungsdaten lässt sich bei 384 Messpunkten pro vollständigen Versuchsdurchlauf und 25 teilnehmenden Probanden auf insgesamt 9600 Datenpunkte für jede abhängige Variable festschreiben. Da ausnahmslos alle Datenpunkte fehlerfrei erfasst werden konnten, beträgt die Datenintegrität 100 Prozent.

Bei den durch die Fragebögen erfassten subjektiven Daten ergeben sich pro Versuchsdurchlauf für jede Frage 24 Datenpunkte. Über alle Probanden kumuliert wurden somit insgesamt 600 Datenpunkte pro Frage erhoben. Das subjektive Ranking bezüglich der Präferenz der einzelnen Ansichten wurde pro Proband hingegen nur einmal erfasst, woraus sich insgesamt 25 Punkte ergeben. Die Integrität aller subjektiven Daten beträgt ebenfalls jeweils 100 Prozent.

Die Anzahl der in der Zusatzaufgabe erhobenen Leistungsdaten variiert mit der probandenabhängigen Bearbeitungsdauer der Hauptaufgabe. Im Durchschnitt wurden pro Szenariensequenz 35,24 Zusatzaufgaben dargeboten, wobei 24,70 Aufgaben, also rund 70 Prozent, tatsächlich auch bearbeitet wurden. Dies entspricht in der Summe 11116 Datenpunkten. Die Datenintegrität der Antworten der Zusatzaufgabe beträgt auch 100 Prozent.

7.3.2. Objektive Leistungsdaten Hauptaufgabe – Haupteffekte

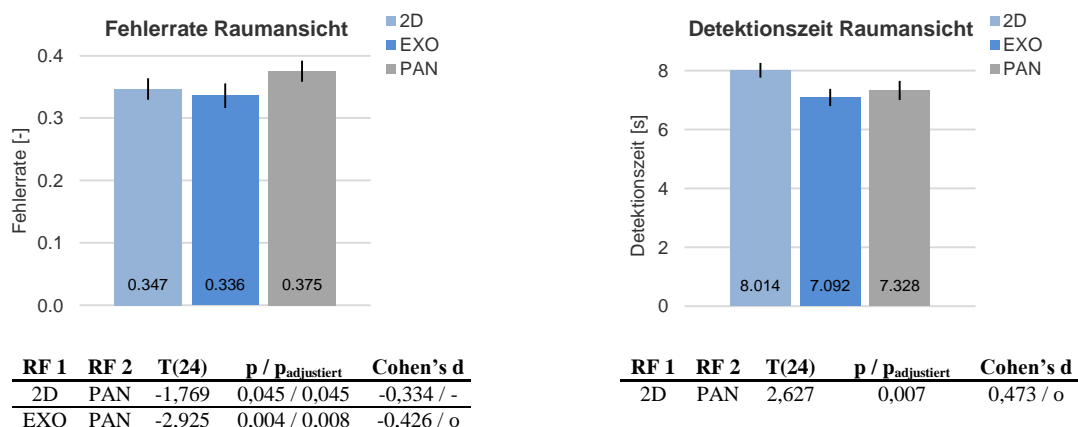
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Haupteffekte für die objektiven Leistungsvariablen der Hauptaufgabe präsentiert. Dabei wird sich auf die Hauptfaktoren Raumformat, Aufgabenschwierigkeit und Art der Zusatzaufgabe beschränkt. Die Operationalisierung der Leistungsvariablen erfolgt durch die Fehlerrate und die Detektionszeit bei der Konflikterkennungsaufgabe.

Auf Paarvergleiche zwischen der zweidimensionalen und exozentrischen Ansicht wird verzichtet, da diese zur Hypothesenprüfung nicht erforderlich sind und aufgrund der Alphafehlerkorrektur gleichzeitig zu unnötig konservativen Ergebnissen der Signifikanzbeurteilung führen würden.

Mittelwerte und Standardfehler der Fehlerrate und der Detektionszeit im Hauptfaktor Raumformat sind in Diagr. 7-1 dargestellt.

Bei Betrachtung der Fehlerrate wird deutlich, dass die Panoramaansicht sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht, als auch im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht signifikante Leistungsdefizite aufweist. Die Fehlerrate fällt dabei um 2,8 und um 3,9 Prozentpunkte höher aus. Der ermittelte Effekt ist beim Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht gering, wohingegen er beim Vergleich mit der exozentrischen Ansicht mittelgroß ist.

Für die Detektionszeit lässt sich aus dem Paarvergleich zwischen der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht kein signifikanter Unterschied feststellen. Der Paarvergleich zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht deutet hingegen auf eine schnellere Detektionszeit der Panoramaansicht hin. Der Mittelwertunterschied beträgt ca. 0,7 s, wobei ein mittlerer Effekt vorliegt.

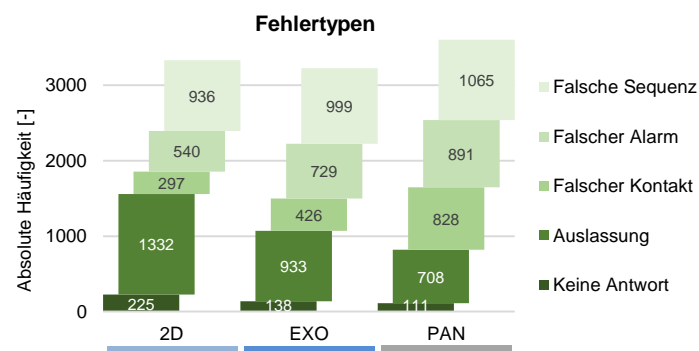


Diagr. 7-1: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Eine Aufspaltung der absolut getätigten Fehler nach einzelnen Fehlertypen wird in Diagr. 7-2 für alle drei Raumformate grafisch dargestellt. Dabei werden insgesamt fünf verschiedene Typen unterschieden: keine Eingabe innerhalb der vorgesehenen Zeit („keine Antwort“), das Übersehen eines Konfliktes („Auslassung“), die Wahl eines Kontaktes, der keinen Konflikt verursacht, wobei ein anderer Kontakt einen Konflikt verursacht („Falscher Kontakt“), die Wahl eines Kontaktes, der keinen Konflikt verursacht, wobei kein anderer Kontakt einen Konflikt verursacht („Falscher Alarm“) und die Wahl eines Kontaktes, der einen Konflikt verursacht, wobei ein anderer Kontakt zeitlich vor diesem Kontakt einen Konflikt verursacht („Falsche Sequenz“).

Bei der Interpretation dieser Grafik sind Vergleiche nur innerhalb eines bestimmten Fehlertyps möglich. Die Ursache hierfür liegt darin, dass einige Fehlertypen in bestimmten Szenarien gar nicht auftreten können. Ein Szenario mit nur einem konfliktverursachenden Kontakt kann beispielsweise keinen Sequenzfehler hervorrufen.

Die wenigsten Fehler des Typs „keine Antwort“ werden bei der Verwendung der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht festgestellt. Verglichen mit der zweidimensionalen Ansicht ist die Häufigkeit nur etwa halb so hoch. Beim Fehler „Auslassung“ wird die geringste Fehlerrate bei der Panoramaansicht ermittelt, gefolgt von der exozentrischen Ansicht. Genau umgekehrt verhält es sich bei den Fehlertypen „Falscher Kontakt“ und „Falscher Alarm“, bei denen die Panoramaansicht die höchste und die zweidimensionale Ansicht die niedrigste absolute Häufigkeit aufweisen. Der Fehlertyp „Falsche Sequenz“ trat bei allen Raumformaten wiederum mit einer ähnlichen Häufigkeit auf.

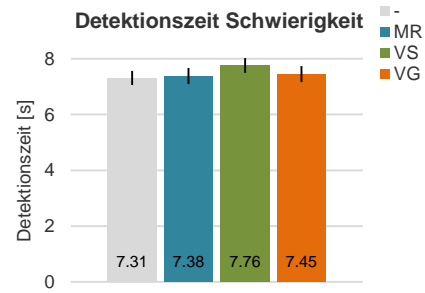
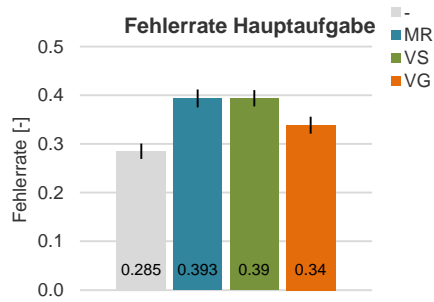


Diagr. 7-2: Absolute Häufigkeit der einzelnen Fehlertypen (FT)

Die durch den Hauptfaktor „Art der Zusatzaufgabe“ induzierten Fehlerraten und Detektionszeiten werden in Diagr. 7-3 visualisiert. Bei der Betrachtung der Fehlerrate der Hauptaufgabe wird deutlich, dass diese am niedrigsten ist, wenn keine Zusatzaufgabe parallel zu bearbeiten ist. Alle Paarvergleiche mit Konfigurationen, in denen eine Zusatzaufgabe zu bearbeiten ist, indizieren eine signifikant niedrigere Fehlerrate, wobei der ermittelte Effekt bei der Gegenüberstellung mit der visuellen Suchaufgabe (VS) und der mentalen Rotationsaufgabe (MR) groß und bei der Gegenüberstellung mit der visuellen Gedächtnisaufgabe (VG) mittelgroß ist. Die Fehlerrate bei der zusätzlichen Bearbeitung der visuellen Gedächtnisaufgabe ist wiederum im Vergleich mit der Fehlerrate bei der zusätzlichen Bearbeitung der mentalen Rotationsaufgabe und visuellen Suchaufgabe signifikant niedriger. Die dabei ermittelte Effektgröße ist jeweils mittelgroß. Zwischen Konfigurationen mit der mentalen Rotationsaufgabe und Konfigurationen mit der visuellen Suchaufgabe bestehen keine signifikanten Unterschiede der Fehlerrate.

Die ermittelten Unterschiede der abhängigen Variable Detektionszeit fallen deutlich geringer aus als die der Fehlerrate. Bei Konfigurationen, in denen neben der Hauptaufgabe zusätzlich die visuelle Suchaufgabe zu bearbeiten ist, ist die Detektionszeit größer als bei Konfigurationen, in denen eine andere oder auch keine Zusatzaufgabe (-) zu bearbeiten ist. Der ermittelte Effekt ist jedoch in allen Fällen gering. Alle anderen Paarvergleiche ergeben keine signifikanten Unterschiede.

Versuch 2: Ergebnisse, Interpretation und Hypothesenprüfung



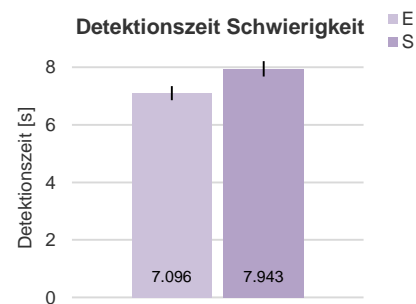
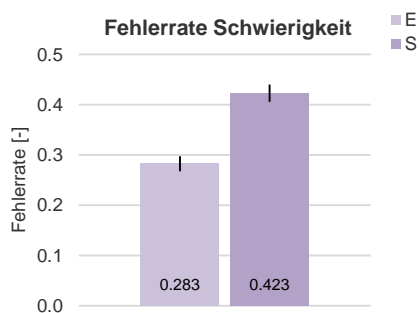
ZA 1	ZA 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
-	MR	-9,615	0 / 0	-1,268 / +
-	VS	-10,252	0 / 0	-1,329 / +
-	VG	-4,384	0 / 0	-0,648 / o
MR	VG	4,355	0 / 0	0,611 / o
VS	VG	4,536	0 / 0	0,640 / o

ZA 1	ZA 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
-	VS	-2,238	0,017 / 0,017	-0,347 / -
MR	VS	-3,700	0,001 / 0,003	-0,273 / -
VS	VG	3,204	0,002 / 0,004	0,224 / -

Diagr. 7-3: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Art der Zusatzaufgabe (ZA)

Diagr. 7-4 visualisiert die objektiven Leistungsdaten des Hauptfaktors Aufgabenschwierigkeit. Bei Betrachtung der abhängigen Variable Fehlerrate wird dabei deutlich, dass schwierige Szenarien deutlich mehr Fehler induzierten als einfache Szenarien. Der Mittelwertunterschied beträgt 14 Prozentpunkte. Der ermittelte Effekt ist hoch.

Ähnlich verhält es sich mit der abhängigen Variable Detektionszeit. Auch diese ist bei schwierigen Szenarien deutlich höher als bei einfachen. Der Mittelwertunterschied beträgt 0,8 s, der ermittelte Effekt ist ebenfalls groß.



SW. 1	SW. 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
E	S	-15,726	0	-1,724 / +

SW. 1	SW. 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
E	S	-12,024	0	-0,660 / +

Diagr. 7-4: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Schwierigkeit (SW)

7.3.3. Objektive Leistungsdaten Hauptaufgabe – Interaktionen 1. Ordnung

Durch Interaktionen 1. Ordnung werden wie auch im ersten Versuch Mittelwertunterschiede eines Faktors auf einer Stufe des anderen Faktors beschrieben. Eine zur Hypothesenprüfung erforderliche Faktorkombination umfasst die Einzelfaktoren Raumformat und Art der Zusatzaufgabe, wobei der Faktor Raumformat auf verschiedenen Stufen des Faktors Art der Zusatzaufgabe betrachtet wird (Diagr. 7-5).

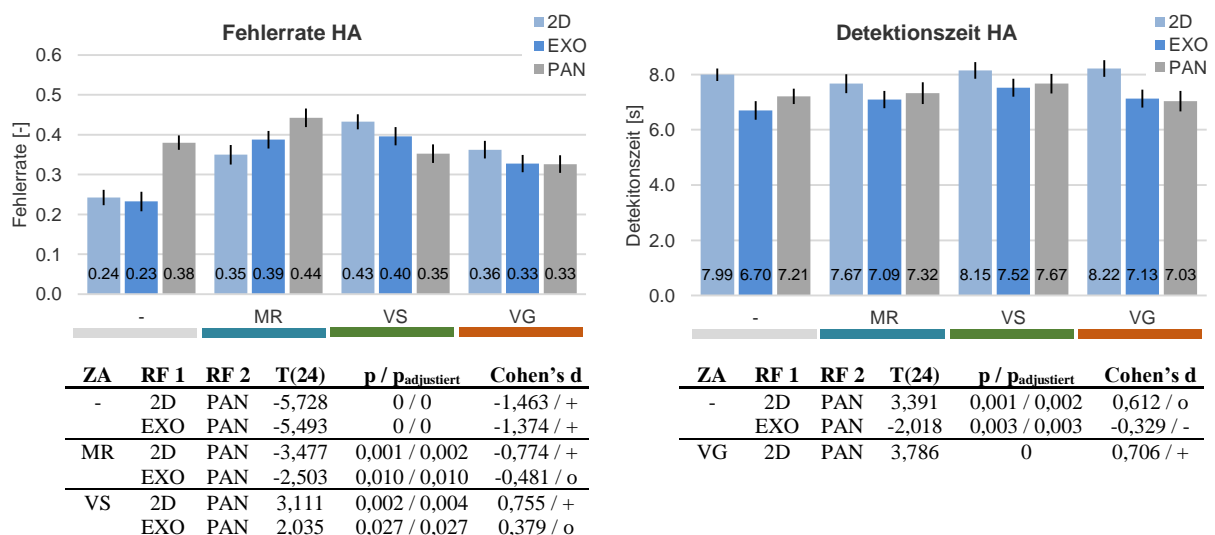
Bei der Durchführung von Paarvergleichen dieser Faktorkombination für die abhängige Variable Fehlerrate werden signifikante Unterschiede bei Konfigurationen ohne Zusatzaufgabe sowie bei Konfigurationen mit mentaler Rotations- und visueller Suchaufgabe ermittelt. Ohne Zusatzaufgabe ist die Fehlerrate der Hauptaufgabe bei Verwendung der Panoramaansicht signifikant höher als bei Verwendung der zweidimensionalen Ansicht oder der exozentrischen Ansicht. Der Mittelwertunterschied beträgt 13,8 und 14,8 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist jeweils groß.

Ähnlich verhält es sich bei der Konfiguration mit mentaler Rotationsaufgabe. Auch hier schneidet die Panoramaansicht im Vergleich mit den konventionellen Ansichten jeweils signifikant schlechter ab. Der Mittelwertunterschied beträgt 9,3 und 5,5 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist groß und mittelgroß.

Bei Konfigurationen mit der visuellen Suchaufgabe als Zusatzaufgabe schneiden die Probanden unter Verwendung der Panoramaansicht hingegen signifikant besser ab als unter Verwendung einer der beiden konventionellen Ansichten. Der Mittelwertunterschied der Panoramaansicht beträgt -8,0 bzw. -4,4 Prozentpunkte. Der ermittelte Effekt ist groß und mittelgroß.

Für die abhängige Variable Detektionszeit werden signifikante Unterschiede bei Konfigurationen ohne Zusatzaufgabe und bei Konfigurationen mit der visuellen Gedächtnisaufgabe als Zusatzaufgabe ermittelt. Ohne Zusatzaufgabe ist die Detektionszeit bei Verwendung der Panoramaansicht im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht signifikant geringer, im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht signifikant größer. Die Mittelwertunterschiede betragen -0,78 s und 0,51 s. Der ermittelte Effekt ist mittelgroß und niedrig.

Auch bei Darbietung der visuellen Gedächtnisaufgabe als Zusatzaufgabe wird eine signifikant niedrigere Detektionszeit unter Verwendung der Panoramaansicht im Vergleich zur zweidimensionalen Ansicht ermittelt. Der Mittelwertunterschied beträgt 1,19 s. Der ermittelte Effekt ist groß.



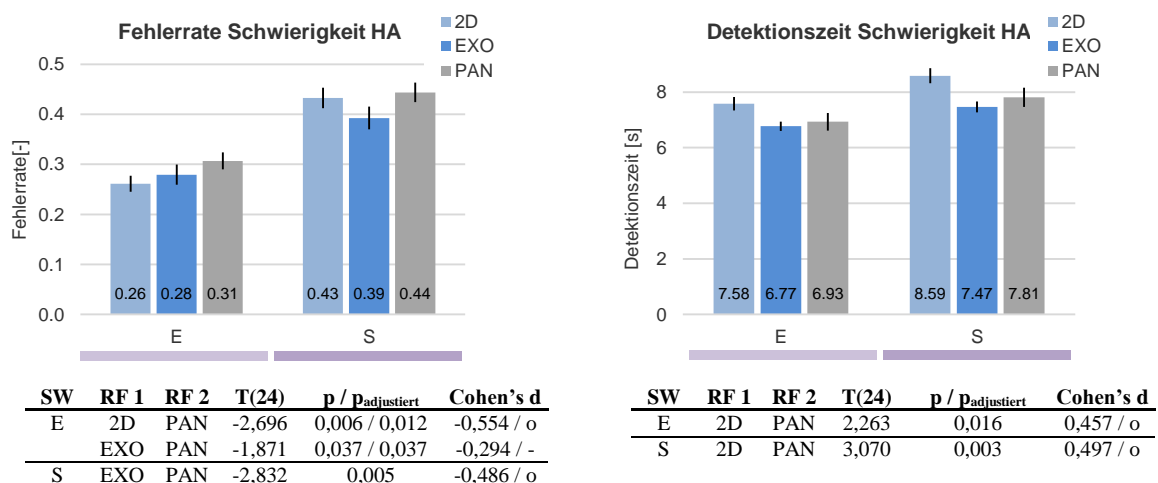
Diagr. 7-5: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Zusatzaufgabe (ZA)

Eine weitere, zur Hypothesenprüfung erforderliche Faktorkombination umfasst die Hauptfaktoren Raumformat und Schwierigkeit der Hauptaufgabe. Der Faktor Raumformat wird dabei wieder auf einer Stufe des zweiten Hauptfaktors, der Schwierigkeit, variiert. Die Ergebnisse für die abhängigen Variablen Fehlerrate und Detektionszeit sind in Diagr. 7-6 dargestellt.

Bei der Fehlerrate lassen sich sowohl für die Bearbeitung einer einfachen als auch einer schwierigen Hauptaufgabe signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Raumformaten feststellen. Ist der Schwierigkeitsgrad einfach, schneidet die Panoramaansicht im Vergleich zu der zweidimensionalen und der exozentrischen Ansicht signifikant schlechter ab. Der Mittelwertunterschied beträgt 4,5 und 2,3 Prozentpunkte. Der ermittelte Effekt ist dabei mittelgroß und niedrig.

Die Ergebnisse der Bearbeitung einer schwierigen Hauptaufgabe indizieren hingegen lediglich einen signifikanten Unterschied zwischen der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht, wobei die Panoramaansicht schlechter abschneidet. Der Mittelwertunterschied beträgt 5,1 Prozentpunkte, die Effektgröße ist mittelgroß.

Anders verhält es sich bei der abhängigen Variable Detektionszeit. Für diese werden zwar ebenfalls signifikante Unterschiede für beide Schwierigkeitsgrade ermittelt, diese beziehen sich jedoch ausschließlich auf den Paarvergleich zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht, wobei die Panoramaansicht in beiden Fällen besser abschneidet. Bei einer einfachen Hauptaufgabe beträgt der Mittelwertunterschied -0,65 s, der ermittelte Effekt ist mittelgroß. Bei der Bearbeitung einer schwierigen Hauptaufgabe ist der Mittelwertunterschied -0,77 s, wobei der ermittelte Effekt ebenfalls mittelgroß ist.

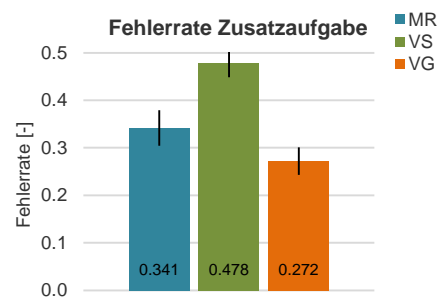


Diagr. 7-6: Fehlerrate und Detektionszeit für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Schwierigkeit (SW)

7.3.4. Objektive Leistungsdaten Zusatzaufgabe

Im Folgenden werden die in der Zusatzaufgabe erzielten Leistungen dargeboten. Wie bereits erwähnt, werden diese ausschließlich durch die Fehlerrate operationalisiert. Als Fehler werden sowohl falsche Antworten, als auch ausgelassene Aufgaben gewertet.

Diagr. 7-7 visualisiert die Fehlerraten, die für die drei einzelnen Zusatzaufgaben ermittelten wurden. Die Fehlerrate bei der Bearbeitung der visuellen Suchaufgabe ist am höchsten, gefolgt von der mentalen Rotationsaufgabe. Die niedrigste Fehlerrate wird bei der Bearbeitung der visuellen Gedächtnisaufgabe ermittelt. Die innerhalb dieser Rangfolge ermittelten Unterschiede sind allesamt signifikant. Der Mittelwertunterschied zwischen visueller Such- und mentaler Rotationsaufgabe beträgt 13,7 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist groß. Der Mittelwertunterschied zwischen mentaler Rotations- und visueller Gedächtnisaufgabe beträgt 6,9 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist mittelgroß. Der Mittelwertunterschied zwischen visueller Such- und visueller Gedächtnisaufgabe beträgt entsprechend 20,6 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist groß.



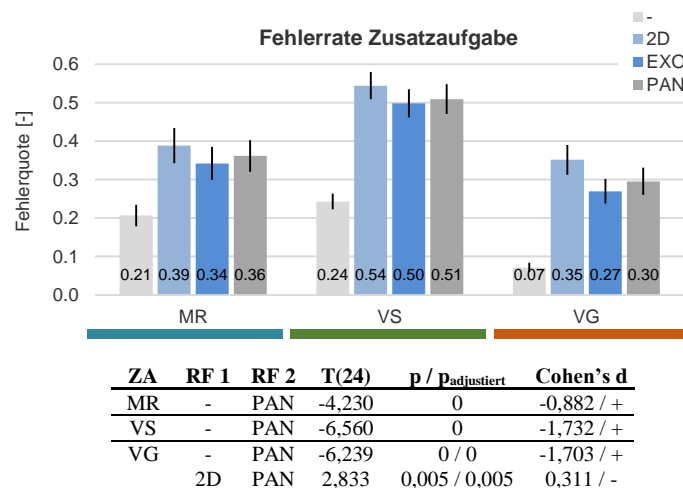
ZA 1	ZA 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
MR	VS	-7,184	0 / 0	-0,810 / +
MR	VG	4,058	0 / 0	0,411 / o
VS	VG	10,995	0 / 0	1,401 / +

Diagr. 7-7: Fehlerrate der Zusatzaufgabe für den Faktor Art der Zusatzaufgabe (ZA)

Eine differenziertere Auswertung der Fehlerrate der Zusatzaufgabe ist in Diagr. 7-8 dargestellt. Die Fehlerrate wird dabei auf der Faktorstufe Zusatzaufgabe für verschiedene Ausprägungen des Faktors Raumformat betrachtet. Zusätzlich zu den Leistungsdaten der drei einzelnen Raumformate sind auch Leistungsdaten einer Vergleichsmessung dargestellt, bei der die Zusatzaufgabe ohne Hauptaufgabe zu bearbeiten war. Paarvergleiche werden dabei wieder auf Vergleiche mit der Panoramaansicht beschränkt.

Zwischen Konfigurationen ohne Hauptaufgabe und Konfiguration, bei denen die Hauptaufgabe mit der Panoramaansicht zu bearbeiten war, können für alle drei Zusatzaufgaben signifikante Unterschiede der Fehlerrate ermittelt werden. Die Fehlerrate ohne Hauptaufgabe ist dabei stets deutlich niedriger. Bei der mentalen Rotationsaufgabe beträgt der Mittelwertunterschied 15,5 Prozentpunkte, bei der visuellen Suchaufgabe 26,6 Prozentpunkte und bei der visuellen Gedächtnisaufgabe 22,4 Prozentpunkte. Der ermittelte Effekt ist in allen Fällen groß.

Des Weiteren ergibt der Paarvergleich zwischen zweidimensionaler Ansicht und Panoramaansicht für die visuelle Gedächtnisaufgabe eine signifikant geringere Fehlerrate der Panoramaansicht. Der Mittelwertunterschied beträgt 5,8 Prozentpunkte, der ermittelte Effekt ist gering.



ZA	RF 1	RF 2	T(24)	p / p _{adjustiert}	Cohen's d
MR	-	PAN	-4,230	0	-0,882 / +
VS	-	PAN	-6,560	0	-1,732 / +
VG	-	PAN	-6,239	0 / 0	-1,703 / +
	2D	PAN	2,833	0,005 / 0,005	0,311 / -

Diagr. 7-8: Fehlerrate der Zusatzaufgabe für den Hauptfaktor Raumformat (RF) in Abhängigkeit der Art der Zusatzaufgabe (ZA)

7.3.5. Objektive Leistungsdaten der Haupt- und Zusatzaufgabe

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in der Haupt- und Zusatzaufgabe erzielten, objektiven Leistungsdaten im Zusammenhang betrachtet. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf die abhängige Variable Fehlerrate. Unter Diagr. 7-9 ist für die drei Zusatzaufgaben jeweils ein zweidimensionales Diagramm dargestellt, in welchem die in der Zusatzaufgabe erzielten Fehlerraten über die in der Hauptaufgabe erzielten Fehlerraten aufgetragen sind. Die zugehörigen numerischen Werte sind in der Tabelle darunter gelistet.

Für jedes der drei Raumformate repräsentieren vertikale Linien die sogenannte Grundleistung der Hauptaufgabe und horizontale Linien die Grundleistung der Zusatzaufgabe. Bei Grundleistungsmessungen wird die Fehlerrate der jeweiligen Aufgabe ohne zusätzliche Bearbeitung der anderen Aufgabe isoliert erhoben. Zusätzlich zu diesen Grundlinien sind in jedem Diagramm drei Messpunkte dargestellt, die für jedes Raumformat beide erzielten Fehlerraten für Konfigurationen widerspiegeln, bei denen Haupt- und Zusatzaufgabe parallel zu bearbeiten sind.

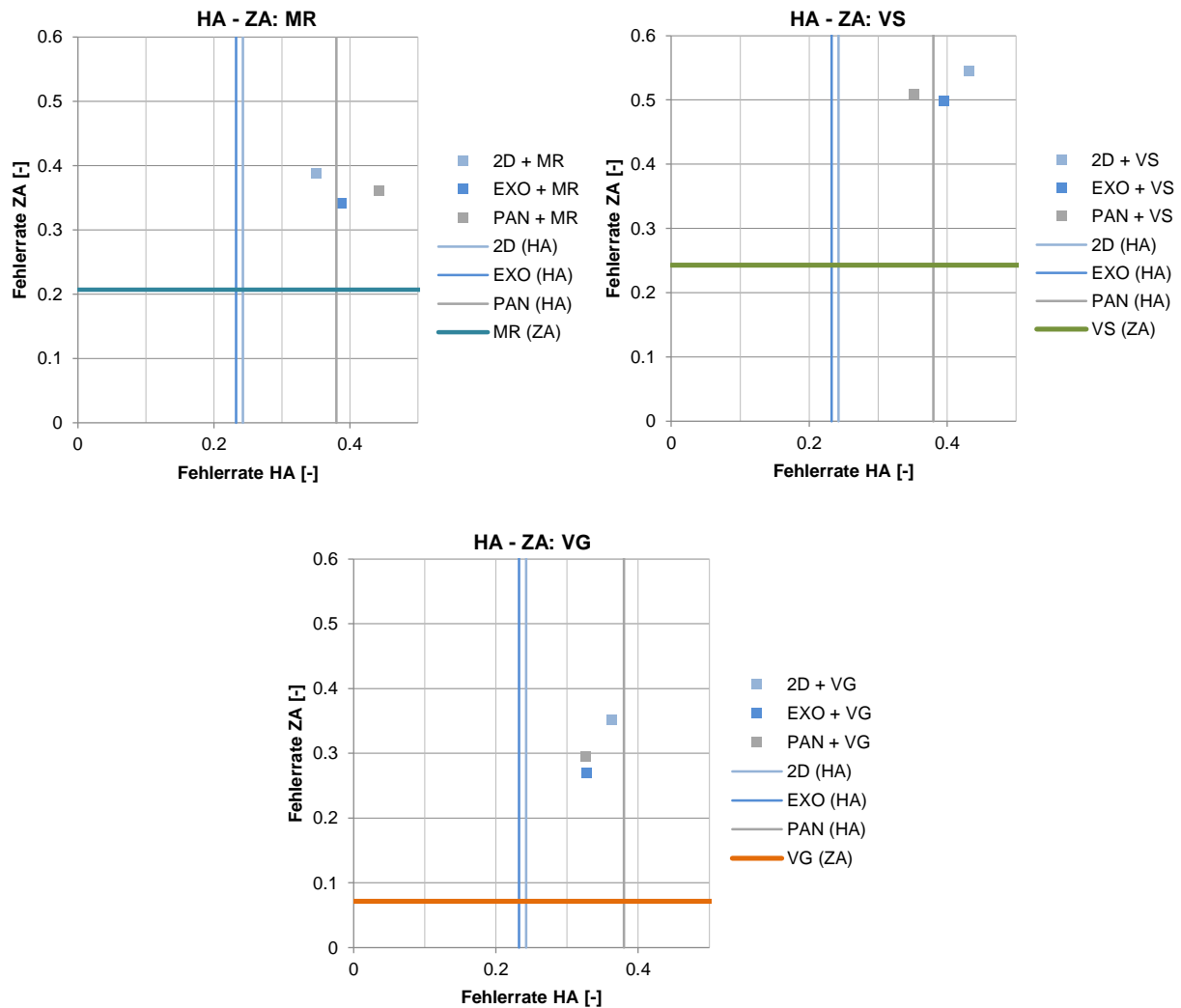
Die Grundlinien der Hauptaufgabe liegen für die zweidimensionale und die exozentrische Ansicht im Bereich 0,23 – 0,24, wohingegen die zur Panoramaansicht gehörende Grundlinie einen verhältnismäßig hohen Wert von 0,38 aufweist. Dieser Wert übersteigt für die parallele Bearbeitung beider Aufgaben die Fehlerrate der Hauptaufgabe, wenn als Zusatzaufgabe die visuelle Suchaufgabe oder die visuelle Gedächtnisaufgabe zu bearbeiten war. Ein Grund hierfür könnten Trainings- oder Lerneffekte sein, die erst nach Beendigung der Grundleistungsmessung ausgeprägt zum Tragen kommen. Bei den mit der zweidimensionalen und exozentrischen Ansicht erhobenen Daten sind die Fehlerraten der Grundleistungsmessung stets deutlich niedriger als die Messpunkte der parallelen Aufgabenbearbeitung.

Bezüglich der mit den Raumformaten erzielten Gesamtleistung sind nur tendenzielle Aussagen möglich, da sich ein vollständiges und eindeutiges Ranking für keine der drei Zusatzaufgaben bilden lässt. Ein Ranking zwischen zwei Messpunkten wird nur dann als eindeutig betrachtet, wenn die Unterschiede in beiden Fehlerraten das gleiche Vorzeichen besitzen.

Die mit der zweidimensionalen Ansicht erzielte Gesamtleistung ist, verglichen mit den anderen Raumformaten, bei der Bearbeitung der visuellen Such- und der visuellen Gedächtnisaufgabe am niedrigsten, da sowohl die Fehlerrate der Haupt- als auch der Zusatzaufgabe in beiden Fällen am höchsten sind. Die exozentrische Ansicht und die Panoramaansicht schneiden dabei jeweils besser ab.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der mentalen Rotationsaufgabe. Dabei lässt sich tendenziell ableiten, dass die mit der Panoramaansicht erzielte Gesamtleistung aufgrund der höchsten Fehlerrate in der Hauptaufgabe und der zweithöchsten Fehlerrate in der Zusatzaufgabe am niedrigsten ist. Die mit der exozentrischen und der zweidimensionalen Ansicht erzielten Leistungen sind höher, wobei eine eindeutige Rangfolge zwischen diesen beiden Ansichten nicht erkennbar ist.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die mit der exozentrischen Ansicht erzielte Gesamtleistung für alle drei Zusatzaufgaben tendenziell am höchsten ist. Im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht ist die mit der Panoramaansicht erzielte Leistung bei der Bearbeitung der visuellen Such- und der visuellen Gedächtnisaufgabe höher, und bei der Bearbeitung der mentalen Rotationsaufgabe niedriger.



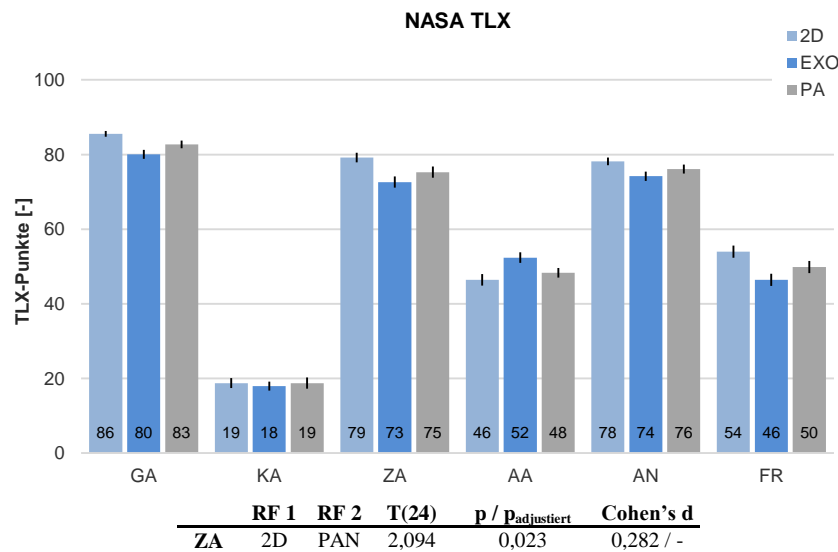
HA / ZA	MR: 0,207	VS: 0,243	VG: 0,071
2D: 0,243	0,350 / 0,388	0,433 / 0,544	0,363 / 0,351
Delta Grundleistung	0,108 / 0,181	0,190 / 0,301	0,120 / 0,280
EXO: 0,233	0,388 / 0,342	0,397 / 0,498	0,328 / 0,270
Delta Grundleistung	0,155 / 0,135	0,164 / 0,255	0,095 / 0,198
PAN: 0,380	0,443 / 0,362	0,353 / 0,509	0,326 / 0,296
Delta Grundleistung	0,063 / 0,155	-0,028 / 0,266	-0,054 / 0,224

Diagr. 7-9: Fehlerrate der Hauptaufgabe (HA) und der Zusatzaufgabe (ZA) bei isolierter und kombinierter Aufgabenbearbeitung für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

7.3.6. Subjektive Daten

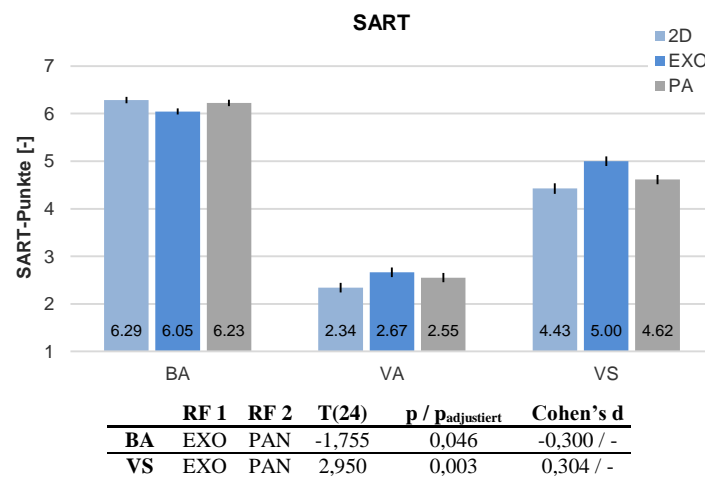
Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Datenerhebung bezüglich des Hauptfaktors Raumformat präsentiert. Diese umfassen Kenngrößen des NASA TLX Fragebogens, des SART Fragebogens sowie eine Rangfolge bezüglich der Eignung der drei Ansichten für die zu bearbeitende Aufgabe und eine Rangfolge bezüglich der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe.

Die Ergebnisse des NASA TLX Fragebogens sind in Diagr. 7-10 visualisiert. Ein Paarvergleich zwischen der zweidimensionalen Ansicht und der Panoramaansicht ergibt lediglich in der Modalität zeitliche Anforderung (ZA) einen signifikanten Unterschied zu Gunsten der Panoramaansicht. Der Mittelwertunterschied beträgt 4 Punkte, der ermittelte Effekt ist gering. Zwischen der exozentrischen Ansicht und der Panoramaansicht kann in keiner Modalität ein signifikanter Unterschied festgestellt werden.



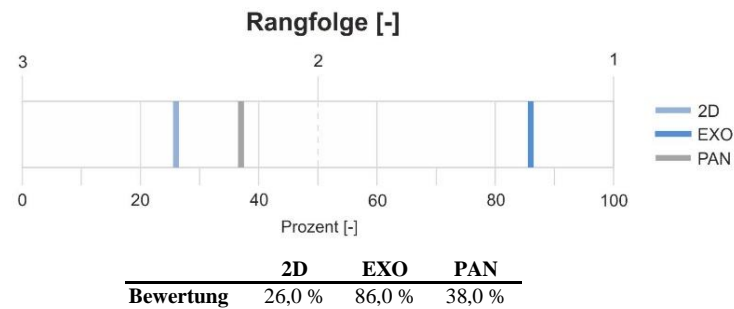
Diagr. 7-10: NASA TLX für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Diagr. 7-11 visualisiert die Ergebnisse der SART Befragung. Signifikante Unterschiede in der Bewertung der Ansichten können in der Kategorie Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen (BA) und Verständnis der Situation (VS) festgestellt werden. Dabei schneidet die Panoramaansicht im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht jeweils signifikant schlechter ab. Der Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen (BA) ist dabei deutlich größer und das Verständnis der Situation ist deutlich schlechter. Der ermittelte Effekt ist allerdings jeweils gering.



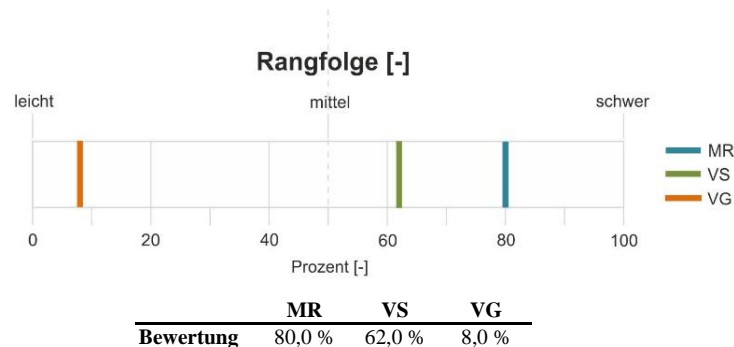
Diagr. 7-11: SART für den Hauptfaktor Raumformat (RF)

Die für die Aufgabenerfüllung präferierte Rangfolge der Raumformate ist in Diagr. 7-12 dargestellt. Die deutlich beste Bewertung weist die exozentrische Ansicht auf. Der Mittelwertunterschied zwischen exozentrischer Ansicht und der Panoramaansicht beträgt 48 Prozentpunkte. Die zweitbeste Bewertung ist für die Panoramaansicht festzustellen, wobei der Unterschied zur zweidimensionalen Ansicht mit 12 Prozentpunkten nur gering ist.



Diagr. 7-12: Subjektive Rangfolge bezüglich der Eignung des Raumformats (RF) für die zu bearbeitende Aufgabe

Diagr. 7-13 visualisiert die subjektiv beurteilte Rangfolge der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe. Die deutlich beste Bewertung im Sinne einer leichten Bearbeitung weist die visuelle Gedächtnisaufgabe auf. Der Mittelwertunterschied beträgt im Vergleich zur mentalen Rotationsaufgabe 72 Prozentpunkte und im Vergleich zur visuellen Suchaufgabe 54 Prozentpunkte. Am schlechtesten schneidet bei dieser Rangfolge die mentale Rotationsaufgabe ab.



Diagr. 7-13: Subjektive Rangfolge bezüglich der wahrgenommenen Schwierigkeit der Zusatzaufgabe (ZA)

7.4. Diskussion

Entgegen der Erwartungen schneidet die Panoramaansicht hinsichtlich der Fehlerrate im Vergleich mit den beiden anderen Raumformaten signifikant schlechter ab (Diagr. 7-1). Als Ursache hierfür kann, anders als im ersten Versuch, nicht der Hemisphäreneffekt herangezogen werden, da bei dieser Aufgabe keine mentale Transformation von graphischen Bildschirmpositionen in numerische Koordinatenkomponenten notwendig war. Die Aufgabe der Probanden bestand in diesem Versuch darin, die Relativposition und -bewegung zweier Objekte zueinander zu beobachten und deren zukünftigen Verlauf zu präzisieren. Ein Verständnis numerischer Positionswerte war dabei nicht zwingend erforderlich.

Bei einer Befragung nach Beendigung des Versuchs gaben die Probanden stattdessen an, dass die ungewohnte Transformation der eigentlich geradlinigen Bewegung zu einer kurvigen Trajektorie auf dem Display Verständnisprobleme bereitete. Während die Prädiktion bei der zweidimensionalen und exozentrischen Ansicht durch imaginäre Geraden erfolgte, musste dies bei der Panoramaansicht durch Kurven geschehen, deren Krümmung entsprechend der aktuellen Objektbewegungsrichtung und Objektposition variierten. Durch den großen physikalischen Darstellungsraum und den verhältnismäßig kleinen Betrachtungszeitraum waren dabei kleine Displaybahnänderungswinkel von 0° – 20° die Regel (Abb. 7-1), wobei die wenigen im Nahbereich erscheinenden Objekte auch um bis zu 90° ihre Richtung ändern konnten. Diese „Trajektorientransformation“ führte bei ungünstigen Objektkonstellationen dazu, dass die Prädiktion eines Konfliktes nur schwer möglich war, wodurch sich die erhöhte Fehleranfälligkeit der Panoramaansicht erklären lässt.

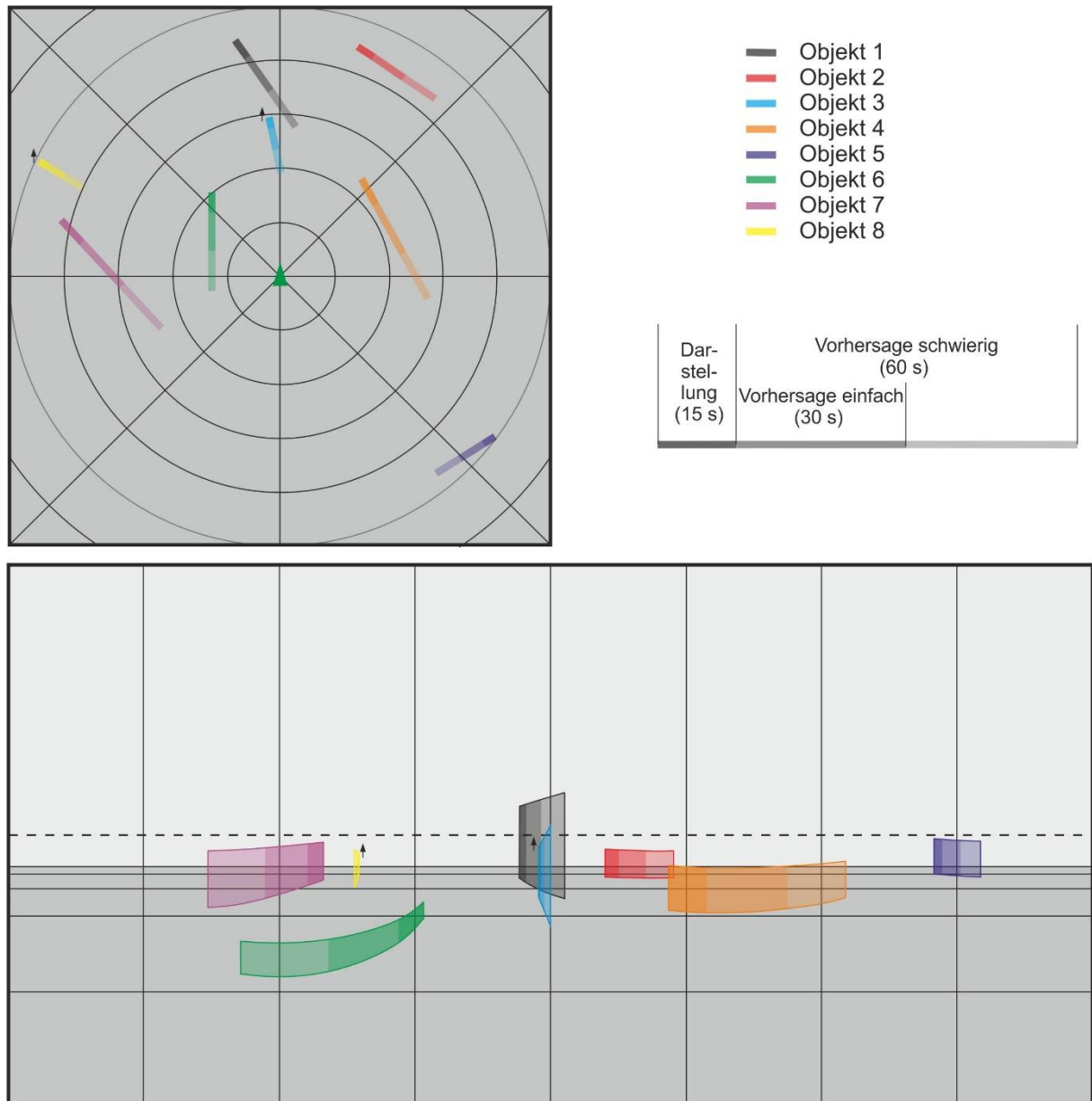


Abb. 7-1: Objektbewegungsspuren eines typischen Szenarios dargestellt in der Draufsicht der zweidimensionalen Ansicht und in der Panoramaansicht

Ein weiterer möglicher Grund für das Leistungsdefizit in der Fehlerrate könnte entsprechend des Probandenfeedbacks in der linearperspektivischen Skalierung des Panoramaformats liegen. Dieser grafische Tiefenschlüssel kann sich beim Verständnis von Objektpositionen unterstützend auf die Wahrnehmung von Raumtiefe auswirken. Bei der Beurteilung von Geschwindigkeiten ist diese Darstellungsart hingegen nicht zwingend von Vorteil. Sie kann stattdessen Fehleinschätzungen für Objektpaare provozieren, bei denen sich ein weitentferntes Objekt mit hoher Geschwindigkeit und ein nah gelegenes Objekt mit niedriger Geschwindigkeit bewegen. Dabei kann es aufgrund der linearperspektivischen Skalierung vorkommen, dass das langsamere Objekt schneller eingeschätzt wird als das real schnellere, welches sich in größerer Entfernung befindet und deshalb auf dem Display deutlich langsamer erscheint.

Auf die Detektionszeit haben die Trajektorientransformation und linearperspektivische Skalierung offensichtlich keine negativen Auswirkungen (Diagr. 7-1). Hinsichtlich dieses Leistungsmaßes schneidet die Panoramaansicht ähnlich gut ab wie die exozentrische Ansicht und signifikant besser ab als die zweidimensionale Ansicht. Das heißt, wenn ein Konflikt richtig erkannt wurde, so geschah dies recht schnell. Diese positive Eigenschaft der Panoramaansicht besitzt aufgrund der insgesamt erhöhten Fehlerrate jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung.

Der Grund für die vergleichsweise geringen Antwortzeiten bei Verwendung der Panoramaansicht liegt in der integrierten Darstellung, die eine zügige Entscheidungsfindung unterstützte. Bei der zweidimensionalen Ansicht mussten hingegen wieder zwei Ansichten zu einer fusioniert werden, um ein stimmiges Gesamtbild zu erhalten. Dies bedurfte zeitraubender, visueller Scan- und kognitiver Transformationsaktivitäten.

Bei der Betrachtung des Fehlerspektrums wird deutlich, dass die Probanden unter Verwendung der Panoramaansicht zu vergleichsweise konservativen Prognosen neigten (Diagr. 7-2). Mit ihr wurden überdurchschnittlich viele Konflikte prognostiziert, die tatsächlich jedoch keine waren. Das größte Defizit ist jedoch hinsichtlich des Fehlertyps falscher Kontakt festzustellen, bei dem ein Kontakt gewählt wurde, der keinen Konflikt verursacht und dafür ein anderer Kontakt übersehen wurde, der tatsächlich einen Konflikt verursachte. Die Fehlerrate ist dabei doppelt bis dreifach so hoch wie bei den anderen Ansichten.

Dafür sind im Vergleich mit beiden anderen Ansichten unterdurchschnittlich viele Auslassungsfehler festzustellen. Des Weiteren haben es die Probanden selten versäumt, eine Antwort innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit zu geben. Für diesen Fehlertyp ist die Fehlerrate nur halb so groß wie bei der zweidimensionalen Ansicht. Die Unterschiede im Sequenzfehler sind hingegen nur gering.

Die hohe Fehlerrate der Panoramaansicht ist somit das Ergebnis des gehäufteten Auftretens der Fehlertypen „Falscher Kontakt“ und „Falscher Alarm“. Die aus der Trajektorientransformation resultierende Unsicherheit der Probanden führte offensichtlich dazu, dass im Zweifelsfall ein Konflikt vorhergesagt wurde, obwohl dies real nicht der Fall war.

Mit Hilfe des zweiten Hauptfaktors, der Art der Zusatzaufgabe, wurde eine erhöhte Arbeitsbelastung in den in Kap 6.4 beschriebenen Modalitäten generiert. Während die in der Zusatzaufgabe erzielte Leistung ein Maß für freie Kapazitäten einer bestimmten Verarbeitungsmodalität repräsentierte, wurde die in der Hauptaufgabe erzielte Leistung auch unter paralleler Bearbeitung einer Zusatzaufgabe als Leistungsmaß für Situationsbewusstsein betrachtet.

Beim Blick auf die Fehlerrate der Hauptaufgabe wird deutlich, dass diese ohne zusätzliche Zusatzaufgabe am niedrigsten ist (Diagr. 7-3). Sowohl die Bearbeitung der Haupt- als auch der Nebenaufgabe erforderten visuelle Ressourcen. Da diese jedoch nur begrenzt zur Verfügung standen, mussten die Probanden ihre Aufmerksamkeit zwischen beiden Aufgaben im Sinne der intramodalen, zeitabhängigen Verteilung von Aufmerksamkeit [166] aufteilen. Das heißt, beide Aufgaben konnten nicht parallel, sondern nur sequentiell bearbeitet werden. Dies führte zu einer Steigerung der Arbeitsbelastung, wie durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird. Eine ebenfalls niedrige Fehlerrate der Hauptaufgabe wird bei der parallelen Bearbeitung der visuellen Gedächtnisaufgabe festgestellt, wohingegen die Bearbeitung der visuellen Such- und der mentalen Rotationsaufgabe zu einer verhältnismäßig hohen Fehlerrate führte.

Etwas anders verhält es sich bei der Detektionszeit, für die ausschließlich für die parallele Bearbeitung der visuellen Suchaufgabe erhöhte Werte festgestellt werden (Diagr. 7-3). Dies ist insofern bemerkenswert, als dass kein Unterschied zwischen alleiniger Bearbeitung der Hauptaufgabe und zusätzlicher Bearbeitung der visuellen Gedächtnis- und mentalen Rotationsaufgabe feststellbar ist.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich einerseits ableiten, dass die Bearbeitung der visuellen Gedächtnisaufgabe, verglichen mit den anderen beiden Zusatzaufgaben, weniger Aufmerksamkeit erforderte. Sowohl die Konflikterkennungsfehlerrate als auch die Detektionszeit waren für diese Art der Zusatzaufgabe am niedrigsten. Die erforderlichen visuellen Scanaktivitäten beschränkten sich auf einen kleinen Bildschirmbereich, in dem die Zahlenreihe dargeboten wurde. Diese, mit der Hauptaufgabe konkurrierende Ressource wurde somit nur gering beansprucht. Als kognitive Ressource wurde

zusätzlich das Kurzzeitgedächtnis gefordert. Der Abruf der darin gespeicherten Informationen konnte sehr schnell erfolgen, weshalb diese Aufgabe insgesamt sehr zügig bearbeitet werden konnte.

Der erhöhte Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen der mentalen Rotationsaufgabe spiegelt sich ausschließlich in der erhöhten Fehlerrate der Hauptaufgabe wider. Der für diese Aufgabe zu betrachtende Bildschirmbereich war etwas größer als bei der visuellen Gedächtnisaufgabe. Da zwei komplexe Volumenkörper miteinander zu vergleichen waren, konnte es zudem vorkommen, dass der Blick der Probanden einige Male hin und her schweifte, bevor eine Entscheidung des Vergleichs getroffen werden konnte. Zusätzlich zur visuellen Ressource wurde als kognitive Ressource das räumliche Vorstellungsvermögen beansprucht, da einer der beiden Volumenkörper für den Vergleich mental rotiert werden musste.

Aufgrund der hohen Fehlerrate und der hohen Detektionszeit in der Hauptaufgabe wird geschlossen, dass die visuelle Suchaufgabe die meisten Aufmerksamkeitsressourcen beanspruchte und somit die größte Arbeitsbelastung aller Zusatzaufgaben generierte. Der kognitive Aufwand bei der Bearbeitung war gering, weshalb als Ursache für die schlechten Leistungswerte der Hauptaufgabe die hohe Beanspruchung der visuellen Ressourcen zu nennen ist. Der zu scannende Bildschirmbereich war, verglichen mit den anderen Zusatzaufgaben, groß, da im ungünstigsten Fall alle 17 gefüllten Zellen der 6 x 6 Matrix betrachtet werden mussten.

Durch den dritten Hauptfaktor wurde die Schwierigkeit der Hauptaufgabe durch die Objektanzahl und den Prädiktionszeitraum in zwei Stufen variiert. In den Ergebnissen wird deutlich, dass sowohl die Fehlerrate als auch die Detektionszeit bei einer erhöhten Schwierigkeit signifikant ansteigen (Diagr. 7-4). Es wird vermutet, dass sich die Erhöhung der Objektanzahl primär in der erhöhten Detektionszeit widerspiegelt, da mehr Objekte betrachtet werden mussten, bevor eine Antwort gegeben werden konnte. Die Vergrößerung des Prädiktionszeitraums von 30 s auf 60 s sollte sich hingegen auf beide Leistungsmaße auswirken, da eine Vergrößerung des Prädiktionszeitraums zu einer erhöhten Schätzunschärfe der Probanden führte und diese wiederum sowohl eine höhere Fehlerrate zur Folge hatte als auch mehr Zeit bei der Entscheidungsfindung erforderte.

Für die Faktorkombination Raumformat und Zusatzaufgabe ist bezüglich der Fehlerrate kein eindeutiges Muster erkennbar (Diagr. 7-5). Ohne Bearbeitung einer Zusatzaufgabe wurden unter Verwendung der Panoramaansicht deutlich höhere Fehlerraten als unter Verwendung einer konventionellen Anzeige erzielt. Ähnlich verhält es sich bei der mentalen Rotationsaufgabe, wohingegen sich der Effekt bei der visuellen Suchaufgabe umkehrt. Da die mentale Rotationsaufgabe verstärkt kognitive und die visuelle Suchaufgabe verstärkt visuelle Ressourcen beanspruchte, lässt sich aus diesen Ergebnissen eine vergleichsweise hohe Beanspruchung kognitiver und eine geringe Beanspruchung visueller Ressourcen durch die Panoramaansicht ableiten.

Verwunderlich ist hingegen, dass die Fehlerrate der Panoramaansicht ohne Zusatzaufgabe ähnlich hoch beziehungsweise sogar leicht höher ist, als die Fehlerrate bei der zusätzlichen Bearbeitung der visuellen Gedächtnis- und der visuellen Suchaufgabe. Man könnte daraus schlussfolgern, dass eine zu niedrige Arbeitsbelastung, wie im Fall einer fehlenden Zusatzaufgabe, zu schlechteren Leistungswerten unter Verwendung der Panoramaansicht führt als bei einer höheren Arbeitsbelastung. Dies wäre dann der Fall, wenn sich Probanden zu sehr auf die Ansicht konzentrieren und beginnen, eigentlich korrekte Entscheidungen zu hinterfragen. Dadurch würde die mangelnde Vertrautheit im Umgang mit dieser Ansicht bestätigt. Andererseits ist nicht ausgeschlossen, dass zunehmendes Training mit fortschreitender Versuchsdauer diesen Effekt verursacht.

Bei der Betrachtung der Detektionszeit fällt auf, dass diese unter Verwendung der Panoramaansicht ohne Zusatzaufgabe und mit der visuellen Gedächtnisaufgabe signifikant niedriger und für die anderen beiden Zusatzaufgaben zumindest tendenziell niedriger ist, als unter Verwendung der zweidimensionalen Ansicht (Diagr. 7-5). Dies ist erwartungskonform und verdeutlicht, dass der im Hauptfaktor 1 ermittelte Vorteil der Panoramaansicht gegenüber der konventionellen Ansicht unabhängig von der Art der Zusatzbelastung erhalten bleibt.

Die andere untersuchte Faktorkombination umfasst die Faktoren Raumformat und Schwierigkeit. Die Fehlerrate der Panoramaansicht ist dabei, unabhängig vom Schwierigkeitsgrad, am höchsten (Diagr. 7-6). Während für die einfache Aufgabenschwierigkeit Defizite der Panoramaansicht sowohl

gegenüber der zweidimensionalen als auch gegenüber der exozentrischen Ansicht festgestellt werden, beschränken sich diese für die hohe Aufgabenschwierigkeit auf den Vergleich mit der exozentrischen Ansicht. Das starke Ansteigen der Fehlerrate der zweidimensionalen Ansicht lässt sich durch den erhöhten mentalen Integrationsaufwand bei der Betrachtung von acht statt sechs Objekten erklären. Der Leistungsvorteil der zweidimensionalen Ansicht schwindet daher mit zunehmender Anzahl an zu beobachtenden Objekten. Der Leistungsbenefit der exozentrischen Ansicht bleibt hingegen unabhängig vom Schwierigkeitsgrad der Aufgabe erhalten.

Bei der Betrachtung der Detektionszeit wird deutlich, dass diese unabhängig vom Schwierigkeitsgrad für die zweidimensionale Ansicht am höchsten ist, wohingegen zwischen exozentrischer Ansicht und Panoramaansicht kein Unterschied ermittelt werden kann (Diagr. 7-6). Die Ursache für das Leistungsdefizit der zweidimensionalen Ansicht liegt wieder in der unter Hauptfaktor 1 beschriebenen erforderlichen mentalen Integration zweier verschiedener Einzelansichten.

Die in der Zusatzaufgabe erzielte Leistung wurde ausschließlich durch die Fehlerrate operationalisiert. Für die visuelle Suchaufgabe beträgt sie knapp 50 %, ein Wert, der theoretisch auch durch Raten hätte erzielt werden können (Diagr. 7-7). Begründen lässt sich diese hohe Fehlerquote durch eine Vielzahl von nicht getätigten Antworten, die stets falsch gewertet wurden. Haupt- und Zusatzaufgabe waren während des Versuchs mit einer gleich hohen Priorität zu bearbeiten. Aufgrund der hochfrequenten Taktung der Zusatzaufgabe konnte es daher passieren, dass eine Antwort nicht innerhalb der 3 s Frist erfolgte und somit als Fehler gewertet werden musste. Die Fehlerraten der mentalen Rotations- und der visuellen Gedächtnisaufgabe sind mit knapp 34 % und mit knapp 27 % deutlich geringer. Analog zu den Fehlerraten der Hauptaufgabe lässt sich mit den Fehlerraten der Zusatzaufgabe schlussfolgern, dass die visuelle Suchaufgabe die Zusatzaufgabe mit der höchsten Schwierigkeit ist. Die visuelle Gedächtnisaufgabe weist hingegen die niedrigste Schwierigkeit auf.

Die Aufschlüsselung dieser Fehlerraten entsprechend des für die Hauptaufgabe verwendeten Raumformats verdeutlicht, dass unabhängig von der Art der Zusatzaufgabe die Fehlerrate unter Verwendung der zweidimensionalen Ansicht am höchsten ist, obgleich der Unterschied nicht immer statistisch bedeutsam ist (Diagr. 7-8). Die Fehlerraten der exozentrischen Ansicht und der Panoramaansicht sind niedriger und nahezu identisch. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Arbeitsbelastung mit der zweidimensionalen Ansicht aufgrund des erhöhten mentalen Integrationsaufwandes höher war, als bei den anderen beiden Ansichten.

Bei der kombinierten Betrachtung der in der Haupt- und in der Zusatzaufgabe erzielten Fehlerraten wird deutlich, dass sich sämtliche Messpunkte der parallel zu bearbeitenden Aufgaben in lokal stark begrenzten Bereichen konzentrieren (Diagr. 7-9). Sowohl die Hauptaufgabenfehlerraten als auch die Zusatzaufgabenfehlerraten weisen in keinem Fall eine höhere Differenz als 10 % auf. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass unabhängig der dargebotenen Ansicht die Priorisierung zwischen beiden Aufgaben stets in etwa gleich erfolgte. Von Ergebnisverfälschungen, die aus einer ansichtsbedingten Fokussierung auf eine von beiden Aufgaben resultieren, ist daher nicht auszugehen. Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch auch, dass die erzielten Gesamtleistungen sich für alle Ansichten nur mäßig unterscheiden.

Bezüglich der subjektiven Beurteilung der Arbeitsbelastung im Rahmen des NASA TLX Fragebogens werden, mit Ausnahme der Modalität zeitliche Anforderung (ZA), keine signifikanten Unterschiede zwischen der Panoramaansicht und den konventionellen Ansichten festgestellt (Diagr. 7-10). Verglichen mit der zweidimensionalen Ansicht wurde die zeitliche Anforderung (ZA) für die Panoramaansicht, wie bereits im ersten Versuch, als niedriger bewertet. Die Begründung hierfür ist wieder in der integrierten Darstellung zu finden. Eine mögliche Ursache, warum insgesamt nicht mehr Vergleiche zwischen den Raumformaten signifikant verschieden ausfielen, liegt in der Tatsache, dass der NASA TLX jeweils für die kombinierte Bearbeitung der Haupt- und Zusatzaufgabe auszufüllen war. Mögliche Belastungsunterschiede die ursprünglich aus der Darstellung der Hauptaufgabe resultierten, konnten so durch Effekte der Zusatzaufgabe überlagert werden.

Beim SART Rating wird analog dem ersten Versuch ein signifikanter Unterschied zwischen der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht in der Modalität Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen (BA) festgestellt (Diagr. 7-11). Dieser Unterschied fällt zu Lasten der Panoramaansicht aus. Die Ur-

sache dieses Defizits ist in der Neuartigkeit der Anzeige und der ungewohnten Darstellung zu finden, die entsprechend dem subjektiven Eindruck mehr Aufmerksamkeitsressourcen erfordert. Dies liegt vor allem an den gekrümmten Objekttrajektorien, deren mentale Projektion in die Zukunft für Ungeübte offensichtlich ein hohes Maß an Aufmerksamkeit erfordert. Ähnlich verhält es sich mit der Modalität Verständnis der Situation (VS), bei der ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Ansichten zu Lasten der Panoramaansicht festgestellt wird. Die Ursache hierfür ist einerseits wieder mit dem ungewohnten Verlauf der Bahntrajektorien zu begründen. Zum anderen setzt das Verständnis der Situation auch das Verständnis von Objektrelationen voraus. Da die Panoramaansicht Relativgeschwindigkeiten und Relativpositionen auf eine den Probanden nicht vertraute Art darstellt, fällt das Verständnis der Situation insgesamt schlechter aus. Interessant ist, dass zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht in keiner SART Modalität signifikante Unterschiede festzustellen sind. Hier scheinen sich die leistungshemmenden Effekte der nicht integrierten Darstellung seitens der zweidimensionalen Ansicht und der ungewohnten Darstellung von Objektrelationen seitens der Panoramaansicht zu kompensieren.

Wie bereits im ersten Versuch repräsentiert die Rangfolge der drei Raumformate die subjektive Beurteilung ihrer Eignung hinsichtlich der zu bearbeitenden Aufgabe. Die exozentrische Ansicht bekommt dabei die deutlich beste Bewertung (Diagr. 7-12). Der Unterschied ist sowohl im Vergleich mit der zweidimensionalen Ansicht als auch im Vergleich mit dem Panoramaformat deutlich. Diese schneiden beide ähnlich schlecht ab, wobei im Vergleich untereinander kein großer Unterschied ermittelt wird. Die Ursache für das schlechte Abschneiden der Panoramaansicht liegt entsprechend den Probandenaussagen in der ungewohnten Darstellungsart und im Konkreten in dem gekrümmten Verlauf der Objekttrajektorien, obgleich die Krümmung in den meisten Fällen nur gering war. Die Tatsache an sich, dass geradlinige Objektbewegungen auf dem Bildschirmen gekrümmt erscheinen, reduzierte die Akzeptanz erheblich. Die schlechte Bewertung der zweidimensionalen Ansicht ist entsprechend den Probandenaussagen wieder ein Resultat der nichtintegrierten Darstellung und dem daraus resultierend erhöhten perceptiven und kognitiven Aufwand beim Verständnis dreidimensionaler Raumzustandsgrößen.

Die Rangfolge der subjektiv wahrgenommenen Schwierigkeit der Zusatzaufgaben spiegelt die objektiv gemessenen Leistungsdaten nur bedingt wider. Prinzipiell ist zu erwarten, dass eine niedrige objektiv gemessene Fehlerrate (Kap. 7.3.4) einen als gering eingeschätzten Aufgabenschwierigkeitsgrad zur Folge hat, beziehungsweise eine hohe Fehlerrate aus einer hohen Aufgabenschwierigkeit resultiert. Für die visuelle Gedächtnisaufgabe, die sowohl objektiv als auch subjektiv am besten abschnitt, trifft dieser Zusammenhang zu (Diagr. 7-13). Bei den anderen beiden Zusatzaufgaben ist dies jedoch nicht der Fall. Während die Fehlerrate der visuellen Suchaufgabe am höchsten ist, ist die subjektiv wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit bei der mentalen Rotationsaufgabe am höchsten. Die hohe Fehlerrate der visuellen Suchaufgabe resultiert primär aus der Zeitkritikalität der Aufgabe, da innerhalb einer kurzen Zeitspanne ein recht großer Displaybereich zu betrachten war. Die Aufgabe an sich war jedoch nicht schwierig und erforderte nur wenig kognitive Ressourcen. Bei der mentalen Rotationsaufgabe verhält es sich umgekehrt. Diese Aufgabe erforderte vermehrt kognitive Ressourcen, die Bearbeitung war innerhalb der angegebenen Zeitspanne jedoch gut realisierbar.

7.5. Hypothesenprüfung

Die Prüfung der Hypothesen des zweiten Hauptversuchs erfolgt exakt nach dem in Kapitel 5.5 beschriebenen und angewandten Schema. Der einzige Unterschied besteht bei der Prüfung von Hypothesen mit Bezug zu objektiven Leistungsdaten darin, dass eine Ebene weniger berücksichtigt werden muss, da die abhängigen Variablen nicht komponentenweise erfasst wurden.

Für alle Hypothesen werden sämtliche durchgeführte Operationen wieder anschaulich in tabellarischer Form dargestellt. Die linke Hälfte einer solchen Tabelle beschreibt die Konfiguration, bei welcher der Einzelvergleich stattfand. Die rechte Hälfte beinhaltet die Ergebnisse der Vergleiche auf den verschiedenen Ebenen.

Direkt neben dem Vergleichsoperator werden für Ungleichheitszeichen auch die Irrtumswahrscheinlichkeiten p und, auf der Ebene auf denen die T-Tests erfolgten, qualitativ die zugehörigen Effektgrößen in Klammern dargestellt. Vergleiche, die einen Vorteil zu Gunsten der Panoramaansicht indizieren, werden in grüner Zellenfarbe und Vergleiche, die einen Vorteil zu Gunsten einer konventionellen Ansicht indizieren, werden in oranger Zellenfarbe hervorgehoben.

H 2.1) *Die erzielte objektive Leistung in Bezug auf die Antizipation von Konflikten hinsichtlich egozentrischer Lufträume ist bei Verwendung des Panoramaformats höher als bei konventionellen Anzeigen.*

Tab. 7-1: Logiktable H 2.1)

Konfiguration		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Variablenebene (T-Test)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	Fehlerrate	> (0,045 / -)	=
	Detektionszeit	< (0,007 / o)	
PAN-EXO	Fehlerrate	> (0,008 / o)	> (0,008)
	Detektionszeit	=	

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.1) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht. Auf Variablenebene existieren insgesamt zwei signifikante Unterschiede, die aufgrund ihrer gegensätzlichen Ausprägung als sich gegenseitig kompensierend betrachtet werden.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.1) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene wird zwar ein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht festgestellt. Dieser besteht jedoch zu Gunsten der exozentrischen Ansicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 0,8 % und ist somit kleiner als 5 %. Der einfließende Effekt ist mittelgroß.

H 2.1 a) *Der Leistungsvorteil des Panoramaformats gegenüber konventionellen Anzeigen bleibt bei Erhöhung des Schwierigkeitsgrades der zu bearbeitenden Aufgabe bestehen.*

Tab. 7-2: Logiktable H 2.1 a)

Kombination			Wertung		
Vergleich Format	Abh. Variable	Schwierigkeit	Schwierigkeits- ebene (T-Tests)	Variablenebene (Log. UND)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	Fehlerrate	E	> (0,012 / o)	=	< (0,019)
		S	=		
	Detektions- zeit	E	< (0,016 / o)	< (0,019)	
		S	< (0,003 / o)		
PAN-EXO	Fehlerrate	E	> (0,037 / -)	> (0,042)	> (0,042)
		S	> (0,005 / o)		
	Detektions- zeit	E	=	=	
		S	=		

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.1 a) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 1,9 % und ist somit kleiner als 5 %. Die einfließenden Effekte beschränken sich auf die abhängige Variable Detektionszeit. Sie sind beide mittelgroß.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.1 a) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene wird zwar ein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht festgestellt. Dieser besteht jedoch zu Gunsten der exozentrischen Ansicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 4,2 % und ist somit kleiner als 5 %. Die einfließenden Effekte sind gering und mittelgroß.

H 2.1 b) *Der Leistungsvorteil des Panoramaformats gegenüber konventionellen Anzeigen bleibt bei der parallelen Bearbeitung verschiedener Zusatzaufgaben bestehen.*

Tab. 7-3: Logiktable H 2.1 b)

Kombination			Wertung		
Vergleich Format	Abhängige Variable	Zusatz- aufgabe	Zusatzaufgaben- ebene (T-Tests)	Variablenebene (Log. UND)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	Fehlerrate	-	> (0,000 / +)	=	=
		MR	> (0,002 / +)		
		VS	< (0,004 / +)		
		VG	=		
	Detektions- zeit	-	< (0,002 / o)	=	
		MR	=		
		VS	=		
		VG	< (0,000 / +)		
PAN-EXO	Fehlerrate	-	> (0,000 / +)	=	=
		MR	> (0,010 / o)		
		VS	< (0,027 / o)		
		VG	=		
	Detektions- zeit	-	> (0,003 / -)	=	
		MR	=		
		VS	=		
		VG	=		

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.1 b) wird nicht bestätigt.

Auf Zusatzaufgabenebene existieren signifikante Unterschiede, die jedoch teilweise gegensätzliche gerichtete Wertungen aufweisen. Eine eindeutig wertende Aussage auf Variablen- oder Formatebene ist nicht möglich.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.1 b) wird nicht bestätigt.

Auf Zusatzaufgabenebene existieren signifikante Unterschiede, die jedoch teilweise gegensätzlich gerichtete Wertungen aufweisen. Eine eindeutig wertende Aussage auf Variablen- oder Formatebene ist nicht möglich.

H 2.2) *Die in der Zusatzaufgabe erzielte Leistung ist unter Verwendung der Panoramaanzeige stets höher als bei konventionellen Anzeigen.*

Tab. 7-4: Logiktable H 2.2)

Kombination		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Zusatzaufgaben-ebene (T-Tests)	Formatebene (Log. UND)
PAN-2D	MR	=	=
	VS	=	
	VG	< (0,005 / -)	
PAN-EXO	MR	=	=
	VS	=	
	VG	=	

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.2) wird nicht bestätigt.

Auf Zusatzaufgabenebene existiert lediglich ein signifikanter Unterschied zu Gunsten der Panoramaansicht. Dieser beschränkt sich auf die visuelle Gedächtnisaufgabe.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.2) wird nicht bestätigt.

Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht.

H 2.3) *Die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung ist beim Panoramaformat niedriger als bei konventionellen Anzeigen.*

Tab. 7-5: Logiktablelle H 2.3)

Kombination		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Modalität (T-Tests)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	GA	=	< (0,023)
	KA	=	
	ZA	< (0,023 / -)	
	AA	=	
	AN	=	
	FR	=	
PAN-EXO	GA	=	=
	KA	=	
	ZA	=	
	AA	=	
	AN	=	
	FR	=	

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.3) wird bestätigt.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 2,3 % und ist somit kleiner als 5 %. Der einfließende Effekt beschränkt sich auf die Modalität zeitliche Anforderungen. Er ist gering.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.3) wird nicht bestätigt.

Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht auf Modalitätsebene.

H 2.4) *Die subjektive Einschätzung hinsichtlich des generierten erweiterten Raumbewusstseins ist beim Panoramaformat besser als bei konventionellen Anzeigen.*

Tab. 7-6: Logiktablelle H 2.4)

Kombination		Wertung	
Vergleich Format	Abhängige Variable	Modalität (T-Tests)	Formatebene (Log. ODER)
PAN-2D	BA	=	=
	VA	=	
	VS	=	
PAN- EXO	BA	> (0,046 / o)	> (0,000)
	VA	=	
	VS	> (0,003 / o)	

PAN – 2D: Die Hypothese H 2.4) wird nicht bestätigt.

Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht auf Modalitätsebene.

PAN – EXO: Die Hypothese H 2.4) wird nicht bestätigt.

Auf Formatebene wird zwar ein signifikanter Unterschied zwischen Panoramaansicht und exozentrischer Ansicht festgestellt. Dieser besteht jedoch zu Gunsten der exozentrischen Ansicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 0 %, die eingehenden Effekte sind beide mittelgroß.

ZH 2) *Verglichen mit einer konventionellen Anzeige wirkt sich das Panoramaformat bei der Generierung von erweitertem Raumbewusstsein in Bezug auf die Antizipation von Luftraumkonflikten unterstützend aus.*

Tab. 7-7: Logiktablelle ZH 2)

Konfiguration			Wertung	
Vergleich Format	Art der Datenerhebung	Hypothesen	Status	ZH 2
PAN-2D	Objektiv	H 2.1)	Nicht bestätigt	Nicht bestätigt
		H 2.1 a)	Bestätigt	
		H 2.1 b)	Nicht bestätigt	
	Subjektiv	H 2.2)	Nicht bestätigt	
		H 2.3)	Bestätigt	
		H 2.4)	Nicht bestätigt	
PAN-EXO	Objektiv	H 2.1)	Nicht bestätigt	Nicht bestätigt
		H 2.1 a)	Nicht bestätigt	
		H 2.1 b)	Nicht bestätigt	
	Subjektiv	H 2.2)	Nicht bestätigt	
		H 2.3)	Nicht bestätigt	
		H 2.4)	Nicht bestätigt	

PAN – 2D: Die Zentralhypothese ZH 2 wird nicht bestätigt.

Die Zentralhypothese ZH 2 wird verworfen, da bei der Betrachtung der objektiven Leistungsdaten kein eindeutiger Vorteil zu Gunsten der Panoramaansicht ermittelt wurde (H 2.1, H 2.2). Auf Variablenebene existieren zwischen beiden Ansichten zwar Unterschiede, global betrachtet kompensieren sich diese jedoch. Im Konkreten heißt dies, dass bei der Panoramaansicht eine niedrigere Detektionszeit bei einer höheren Fehlerrate festgestellt wurde. Die Verbesserung der einen Leistungsvariable wird durch eine Verschlechterung der anderen Leistungsvariable erkaufte. Die Bestätigung, dass die in H 2.1 festgestellte, geringere Detektionszeit unter Verwendung der Panoramaansicht auch bei verschiedenen Schwierigkeitsgraden bestehen bleibt (H 2.1 a), ist zur Prüfung von ZH 2 somit belanglos. Ähnliches gilt für die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung (H 2.3). Für diese wurde zwar ein Vorteil zu Gunsten der Panoramaansicht ermittelt. Zur Bestätigung von ZH 2 werden jedoch allein subjektive Indikatoren als nicht hinreichend betrachtet. Anders als bei dieser Gegenüberstellung sollen sie vielmehr dazu dienen, die objektiven Leistungsdaten zu bestätigen.

PAN – EXO: Die Zentralhypothese ZH 2 wird nicht bestätigt.

Die Zentralhypothese ZH 2 wird verworfen, da keine der sechs Hypothesen bestätigt wurde.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass sich die Panoramaansicht zur Generierung von erweitertem Raumbewusstsein in Bezug auf die Antizipation egozentrischer Luftraumkonflikte weder im Vergleich mit der zweidimensionalen noch im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht unterstützend auswirkt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung neuer Cockpitanzeigen besteht in der adäquaten und zielgerichteten Darbietung von Informationen. Rauminformationen nehmen dabei eine zentrale Rolle ein. Das Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung und Validierung eines neuartigen Konzepts zur Darstellung von Rauminformationen vor dem Hintergrund eines maximierten Situationsbewusstseins des Piloten. Der entscheidende Anstoß des Entwicklungsvorhabens wurde durch die jüngst erzielten technischen Fortschritte im Bereich der Displaytechnologien gegeben, welche die Möglichkeiten grafischer Visualisierungen im Cockpit erheblich erweitern.

Im stetigen Dialog mit aktivem Flugpersonal wurde ein perspektivisches Panoramaformat zur Visualisierung von Rauminformationen entwickelt. Die treibende Idee dabei war es, die Vorteile verschiedener konventioneller Anzeigen in ein und demselben Format zu vereinen. Dies war auf der einen Seite die Stärke egozentrischer Perspektiven bezüglich der Unterstützung der primären Flugführungsaufgabe und auf der anderen Seite die Eigenschaft exozentrischer Darstellungen, die Generierung von Situationsbewusstsein auf globaler Ebene hinsichtlich der Erfassung von Objektrelationen zu fördern. Die Notwendigkeit der parallelen Bearbeitung beider Aufgabentypen wurde durch die Ergebnisse einer hierarchischen Aufgabenanalyse belegt, die in Zusammenarbeit mit fliegerischem Personal durchgeführt wurde. Durch die Beschränkung der Aufmerksamkeit auf ein einziges Format sollte mit dem Panoramaformat die in beiden Aufgaben erzielte Gesamtleistung verbessert werden, da sowohl der visuelle Such- als auch der mentale Transformationsaufwand, der bei der Fusion von Informationen mehrerer Einzelanzeigen notwendig ist, entfällt.

Zur Realisierung des Vorhabens wurde für das perspektivische Panoramaformat mit der sphärischen Projektion eine Projektionsart gewählt, deren Abbild Winkeltreue aufweist. Die Krümmung der kugelförmigen Projektionsfläche ermöglicht die Darstellung beliebiger Raumsegmente. Die Ausrichtung der virtuellen Projektionskamera kann entweder NED-zentriert oder kurswinkelzentriert erfolgen. Dies entspricht stets einem Outside-In Referenzrahmen einer konventionellen Flugführungsanzeige, wobei das horizontale Displayzentrum wie bei einer Kartendarstellung entweder nach Norden beziehungsweise Süden oder in die aktuelle Flugrichtung zeigt. Die geometrischen Blickfelder der Abbildung können kontinuierlich variiert werden und betragen bis zu 360° in der horizontalen und 180° in der vertikalen Dimension. Somit ist die vollständige Darstellung beider umgebender Hemisphären aus der egozentrischen Perspektive möglich.

Um eine mögliche Eignung der Ansicht im Cockpit zu untersuchen, wurden die Begriffe des einfachen und erweiterten Raumbewusstseins als spezifische Ausprägungen des Situationsbewusstseins eingeführt. Das Konstrukt des erweiterten Raumbewusstseins wurde ferner hinsichtlich des Bewusstseins von egozentrischen und exozentrischen Objektrelationen unterschieden.

Als Analysemethode wurde eine vergleichende Untersuchung gewählt. Die Vergleichsgrundlage bildeten dabei zwei konventionelle Formate, die sich im Flugbetrieb bereits bewährten und die Generierung von globalem Situationsbewusstsein unterstützen. Dies waren zum einen die zweidimensionale, koplanare Ansicht und zum anderen die exozentrische, gebundene Ansicht. Mit Hilfe der Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen sowie einer Analyse der Besonderheiten der neuartigen perspektivischen Panoramaansicht konnte der Forschungsbedarf der vergleichenden Untersuchung auf das Bewusstsein hinsichtlich egozentrischer Objektrelationen eingegrenzt werden. Um die fliegerische Kontextvalidität sicherzustellen, wurden bei der Aufgabenauswahl die Ergebnisse einer hierarchischen Task Analyse entsprechend eingeschränkt und zwei Aufgaben gewählt, die beide das Bewusstsein egozentrischer Objektrelationen voraussetzen, sich jedoch hinsichtlich des aufzunehmenden und zu verarbeitenden Informationsgehaltes grundlegend unterscheiden.

Die Aufgabe der ersten Untersuchung bestand darin, Objekte, die in den verschiedenen Raumformaten dargestellt wurden, zu beobachten und abschließend die aktuellen oder zukünftigen dreidimensionalen Koordinaten eines bestimmten Objektes möglichst schnell und exakt wiederzugeben. Bei der zweiten Untersuchung bestand die Aufgabe der Probanden darin, zukünftig eintretende Konflikte bezüglich eines egozentrisch referenzierten Luftraums zu prognostizieren. Während für die Aufgabe des ersten

Versuchs Displaypositionen in numerische Werte einzelner Koordinatenkomponenten übersetzt werden mussten, war es im zweiten Versuch ausreichend, relative Displaypositionen und Geschwindigkeiten abzuschätzen um eine Entscheidung bezüglich eines möglichen Luftraumkonfliktes zu treffen.

Die Generierung objektiver Messdaten zur Beurteilung des Raumbewusstseins erfolgte für beide Aufgaben indirekt über die erzielte Aufgabenleistung. Dieser Ansatz wird als zulässig betrachtet, da davon auszugehen ist, dass das generierte Raumbewusstsein und die Aufgabenleistung miteinander korrelieren. Die erzielte Aufgabenleistung wurde für beide Untersuchungen durch ein Qualitätsmaß und ein Zeitmaß operationalisiert. Als Qualitätsmaß der ersten Aufgabe diente die mittlere Abweichung zwischen geschätzten und tatsächlichen Objektkoordinaten. Das Zeitmaß wurde durch die für die Wiedergabe benötigte Zeit beschrieben. Die Fehlerrate bei der Konflikterkennung und die Konflikterkennungszeit repräsentierten das Qualitäts- und das Zeitmaß des zweiten Versuchs. Subjektive Datenerhebungen erfolgten bei beiden Aufgaben durch Selbsteinschätzung der Probanden nach Beendigung der einzelnen Versuchsdurchläufe.

Die Ergebnisse beider Validierungsstudien belegen jedoch, dass die Erwartungen an das entwickelte Raumformat hinsichtlich der abgebildeten Aufgaben nicht erfüllt werden, da die Panoramaansicht im Vergleich mit der exozentrischen Ansicht jeweils in mehreren Vergleichskriterien signifikante Defizite aufweist, ohne in einem einzigen Vergleichskriterium besser als sie abzuschneiden.

Als primäre Ursache des Defizits im ersten Versuch wurde der Hemisphäreneffekt identifiziert, der sich in häufigeren Wiedergabefehlern und erhöhten Wiedergabezeiten der Azimutdimension äußerte. Entsprechend der Probandenaussagen waren ausschließlich Azimutwinkel für Objekte der hinteren Hemisphäre schwierig zu interpretieren. In der Tat widerspricht die neuartige Darstellungsart der natürlichen Raumwahrnehmung des Menschen, dessen Augen in die vordere Hemisphäre gerichtet sind. Die hintere Hemisphäre wird hingegen nur im Randbereich wahrgenommen. Inwieweit dieser Diskrepanz durch Training begegnet werden kann, wurde in dieser Untersuchung nicht ermittelt und wird als Gegenstand zukünftiger Untersuchungen betrachtet. Obgleich das azimutale Raumverständnis bei 360°-Panoramen Probleme bereitet, konnte durch Vorversuche belegt werden, dass azimutale Objektpositionen bei Blickfeldern von bis zu 180° sehr gut interpretiert werden können.

Neben dem Hemisphäreneffekt wurde auch die geradlinige und diskontinuierliche Azimutskala als leistungsmindernder Faktor der Panoramadarstellung ermittelt. Zyklische Winkelwerte weitwinkliger Blickfelder über eine geradlinige Skala zu erfassen ist für die Probanden ungewohnt und erfordert zusätzliche kognitive Ressourcen. Gleiches gilt für den sprunghaften Übergang von Objekten über die 180° Azimutschwelle bei 360°-Panoramen. Das dabei auftretende gleichzeitige Verschwinden und Erscheinen von Objekten am linken beziehungsweise rechten Bildschirmrand wirkt zudem stark aufmerksamkeitslenkend, wodurch der Proband von seiner eigentlichen Aufgabe abgelenkt werden kann.

Eine weitere Ursache für die Defizite der Panoramaansicht ist in der linearperspektivischen Skalierung von Tiefeninformationen begründet. Diese Darstellungseigenschaft unterstützt die Wahrnehmung von Raumtiefe eigentlich in Form eines Tiefenschlüssels (2.5.5). Bei der Erfassung von exakten Objektkoordinaten der Raumdimensionen Entfernung und Höhe kann sich dieser Effekt insbesondere für weit entfernte Objekte jedoch hinderlich auswirken, da die Auflösung in beiden Dimensionen mit zunehmender Raumtiefe abnimmt. Besonders sichtbar ist dies bei der Betrachtung der Objekthöhe, deren Wiedergabegenauigkeit mit der Panoramaansicht deutlich schlechtere Werte aufweist als mit der exozentrischen Ansicht.

Für den zweiten Versuch wurde eine Aufgabe gewählt, bei der die Kenntnis der exakten numerischen Werte von relativen Objektpositionen nicht relevant war. Aus diesem Grund wurde davon ausgegangen, dass sich sowohl der Hemisphäreneffekt als auch die linearperspektivische Skalierung nicht leistungshemmend auf das Versuchsergebnis auswirken. Der Vergleich zwischen den mit der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht erzielten Leistungsdaten offenbart dennoch erhebliche Unterschiede zu Lasten der Panoramaansicht, die nicht ausschließlich mit der diskontinuierlichen Azimutskala erklärt werden können. Wie aus dem Dialog mit den Probanden zu schließen ist, ist die Ursache für das schlechte Abschneiden der Panoramaansicht in der Trajektorientransformation zu finden. Die negativen Auswirkungen dieses Effektes wurden erst im zweiten Versuch identifiziert,

weil dieser im Vergleich zum ersten Versuch eine längere Szenarienzeitspanne aufwies. Deutlich wurde dieser Effekt vor allem bei Objekten, die sich im Nahbereich befanden und deren Relativgeschwindigkeit eine große tangentielle Komponente besaß. Eine eigentlich geradlinige Bewegung wurde durch die Panoramaansicht dann stark gekrümmt dargestellt.

Aus dem Fehlerbild des zweiten Versuchs kann zudem geschlussfolgert werden, dass Probanden mit der Panoramaansicht im Vergleich zur exozentrischen Ansicht zu konservativeren Abschätzungen neigen. Während die Anzahl der Auslassungsfehler vergleichsweise niedrig war, traten Fehler durch einen falschen Alarm, einen falschen Kontakt oder einer falschen Sequenz mit einer erhöhten Häufigkeit auf. Das heißt, im Zweifelsfall entschieden sich die Probanden unter Verwendung der Panoramaansicht für den Konflikt und nicht gegen ihn. Inwieweit das ermittelte Fehlerbild eine unmittelbare Folge der Visualisierung der Panoramaansicht ist, oder aber aus einem bei neuartigen Darstellungen stets konservativeren Schätzverhalten der Probanden resultiert, wurde im Rahmen der Untersuchung nicht eindeutig geklärt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Leistungsdefizit der Panoramaansicht und der Art einer zusätzlichen Belastung kann nicht festgestellt werden. Da unter Verwendung beider Ansichten alle Zusatzaufgaben ähnlich gut bearbeitet wurden, lässt sich zudem schlussfolgern, dass beide Ansichten auch ähnlich viele Aufmerksamkeitsressourcen beanspruchen. Eine Ursache hierfür liegt in der integrierten Darstellung, die zusätzlichen visuellen Such- und mentalen Integrationsaufwand bedarf.

Die aus den objektiven Leistungsdaten gewonnenen Erkenntnisse werden durch die Ergebnisse der subjektiven Befragungen gestützt. Bei diesen wurde die exozentrische Ansicht stets als die für die jeweilige Aufgabenbearbeitung beste Ansicht gewählt. Am zweitbesten schnitt jeweils die Panoramaansicht ab. Verwunderlich ist dabei, dass der Unterschied zwischen beiden Ansichten im ersten Versuch deutlich geringer ausfällt als im zweiten Versuch. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Auswirkungen der Trajektorientransformation subjektiv als störender empfunden wurden als die des Hemisphäreneffektes.

Der Vergleich der Panoramaansicht mit der zweidimensionalen Ansicht fällt für beide Versuche weniger eindeutig aus. Dabei ist festzuhalten, dass in einigen Bewertungskriterien die Panoramaansicht besser und in einigen Bewertungskriterien schlechter abschneidet. Beide Ansichten besitzen Eigenschaften, welche die Bearbeitung der im Versuch dargebotenen Aufgaben erschweren. Diese sind der Hemisphäreneffekt, die geradlinige und diskontinuierliche Azimutskala und die linearperspektivische Skalierung seitens der Panoramaansicht und die nichtintegrierte Darstellungsart seitens der zweidimensionalen Ansicht.

Beim ersten Versuch werden bei Betrachtung der Azimutdimension wieder die negativen Auswirkungen des Hemisphäreneffektes und der geradlinigen, diskontinuierlichen Azimutskala deutlich. Diese äußern sich beim direkten Vergleich zwischen Panoramaansicht und zweidimensionaler Ansicht in einer erhöhten Wiedergabezeit bei der Panoramaansicht. Bei der Höhendimension verhält es sich hingegen aufgrund der nichtintegrierten, zweidimensionalen Darstellung umgekehrt. Da die anderen beiden Raumdimensionen direkt aus dem Kartenformat erfasst werden konnten, war die Höhendimension stets die Variable, die mit den anderen beiden Raumdimensionen fusioniert werden musste. Unter erhöhten Zeitdruck konzentrierten sich die Probanden im Zweifelsfall auf die Dimensionen Azimut und Entfernung.

Aus den Ergebnissen des zweiten Versuchs lässt sich ebenfalls keine eindeutige Wertung zu Gunsten oder Lasten der Panoramaansicht schließen. Während bei Verwendung der Panoramaansicht die Fehlerrate bei der Konflikterkennung deutlich höher war, erfolgte die korrekte Zu- oder Abweisung von Konflikten in einer deutlich kürzeren Zeit. Die Ursache für die höhere Fehlerrate der Panoramaansicht ist wieder in der Trajektorientransformation zu finden, wohingegen die geringere Detektionszeit durch die integrierte Darstellungsform begründet werden kann.

Das Fehlerbild bei der Konflikterkennung verdeutlicht analog dem vorherigen Vergleich, dass die Probanden unter Verwendung der Panoramaansicht zu konservativeren Schätzungen neigen. Auslassungsfehler und Fehler durch Nichtantworten treten deutlich seltener auf, wohingegen Fehler durch einen falschen Alarm oder Wahl eines falschen Kontaktes eine erhöhte Häufigkeit aufweisen.

Auf Basis der subjektiv erhobenen Daten lässt sich auch festhalten, dass die Arbeitsbelastung bei Verwendung der Panoramaansicht niedriger ist als bei der zweidimensionalen Ansicht. Gestützt wird dies durch die objektiv erhobenen Fehlerraten der Zusatzaufgabe, welche bei der zweidimensionalen Ansicht stets am höchsten sind. Die Ursache hierfür ist wieder in dem erhöhten visuellen Such- und mentalen Integrationsaufwand zu finden. Die vergleichsweise niedrige Arbeitsbelastung spiegelt sich auch in der subjektiven Rangfolge der Ansichten wider, in der die Panoramaansicht in beiden Versuchen besser bewertet wurde als die zweidimensionale Ansicht.

Die Vieldeutigkeit der Panoramaansicht und der exozentrischen Ansicht scheint hingegen nur einen vergleichsweise geringen, leistungshemmenden Einfluss auf die Probandenleistung zu haben. Dies wird bei der Gegenüberstellung von exozentrischer und zweidimensionaler Ansicht deutlich. Die Darstellung von Objektloten ist in diesem Zusammenhang wohl der entscheidende Tiefenschlüssel, der es den Probanden ermöglicht, einzelne Raumdimensionen leicht und eindeutig zu dekodieren. Eine übersichtliche Zusammenfassung der darstellungsrelevanten Vor- und Nachteile der untersuchten Raumformate wird in Tab. 8-1 gegeben.

Tab. 8-1: Vor- und Nachteile der untersuchten Raumformate

Zweidimensionales, koplanares Format	Exozentrisches, gebundenes Format	Perspektivisches Panoramaformat
+ Keine Vieldeutigkeit	+ Integration aller Raumdimensionen in einer Abbildung	+ Integration aller Raumdimensionen in einer Abbildung.
+ Zyklische Azimutskala	+ Zyklische Azimutskala	+ Integration von Parametern der primären Flugführungsaufgabe
– Integration von nur zwei Raumdimensionen in einer Abbildung	– Vieldeutigkeit	– Hemisphäreneffekt
– Keine Integration von Parametern der primären Flugführungsaufgabe	– Keine Integration von Parametern der primären Flugführungsaufgabe	– Diskontinuierliche, geradlinige Azimutskala
		– Trajektorientransformation
		– Vieldeutigkeit
		– Linearperspektivische Skalierung

Final lässt sich festhalten, dass die Panoramaansicht unter den gegebenen Rahmenbedingungen für beide untersuchte Aufgaben lediglich die zweitbeste Alternative nach der exozentrischen Ansicht darstellt. Als große Unbekannte, welche einer vertieften Untersuchung bedarf, ist dabei der Trainingseffekt zu nennen. Entsprechend der Probandenaussagen hinterließ die neuartige Darstellung bei der ersten Begegnung zunächst einen ungewohnten und synthetischen Eindruck. Nach einer kurzen Kennenlernphase war bei vielen Testpersonen jedoch eine steile Lernkurve zu erkennen. Dabei konnte nicht ausgeschlossen werden, dass sich diese Lernkurve auch während des Versuchs fortsetzte. Ein fairer Vergleich zwischen konventionellen Ansichten und der Panoramaansicht war somit nur bedingt möglich.

Als entscheidender Grund für das Leistungsdefizit der Panoramaansicht wird vor allem das untersuchte horizontale Blickfeld von 360° betrachtet. Neben dem Hemisphäreneffekt wirkt sich dabei auch die Trajektorientransformation negativ auf die Darstellung aus. Der Einfluss beider Effekte sinkt mit Abnahme des horizontalen Blickfeldes. Interessant wäre in diesem Zusammenhang daher ein Vergleich der drei Ansichten unter Beschränkung auf die Darstellung der vorderen Hemisphäre. Inwieweit der Leistungsvorsprung der exozentrischen Ansicht dabei kompensiert würde, kann anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht abgeschätzt werden.

Das Ziel, eine Darstellungsart zu entwickeln, die gleichermaßen die Durchführung der primären Flugführungsaufgabe und die Beurteilung egozentrischer Objektrelationen für die komplette umgebende Hemisphäre unterstützt, wurde nicht erreicht. Das entwickelte Panoramaformat eignet sich zwar für die Integration von Parametern zur Durchführung der primären Flugführungsaufgabe. Die identifi-

zierten Defizite bei der Beurteilung egozentrischer Objektrelationen sind für die untersuchten Aufgaben hingegen so gravierend, dass für sie deren Bearbeitung nicht empfohlen werden kann. Stattdessen ist auf die exozentrische Ansicht als Alternative zurückzugreifen. Parameter zur Durchführung der primären Flugführungsaufgabe müssen dabei nach wie vor über eine separate Anzeige vermittelt werden.

Die Entwicklung der untersuchten Panoramaansicht orientierte sich an einem hochagilen Flugzeug. Die ermittelten Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen sich uneingeschränkt auf andere zivile und militärische Flugzeugmuster übertragen.

Obgleich die Panoramaansicht für die untersuchten Aufgaben Defizite aufweist, wird eine prinzipielle Anwendung als Raumformat für andere Cockpittätigkeiten nicht ausgeschlossen. Entscheidend ist dabei, die Auswirkungen der leistungshemmenden Effekte zu minimieren, indem Informationsmenge und Integrationsgrad der Darstellung an die jeweilige Aufgabe angepasst werden. Denkbar sind in diesem Zusammenhang beispielsweise Anwendungen als Assistenzdisplay zur Vermeidung von Kollisionen und als taktisches Display zur erweiterten Darstellung von Sensorinformationen. Die Anwendungsumgebung beschränkt sich dabei nicht auf das Flugzeugcockpit, sondern kann auch auf Bodenstationen unbemannter Flugobjekte, die sich durch ein nahezu unbegrenztes Platzangebot für Großflächendisplays auszeichnen, erweitert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] ICAO, „<http://www.icao.int/sustainability/Documents/FastFacts/WorldAviation.png>“, [Online]. [Zugriff am 20. April 2015].
- [2] M. R. Endsley, „Situation Awareness in Aviation Systems“, in *Handbook of Aviation Human Factors*, Mahwah, NJ, USA, Lawrence Erlbaum Associates, 1999, pp. 257-276.
- [3] D. A. Wiegmann und S. A. Shappell, *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*, Aldershot, GB: Ashgate Publishing Group, 2003.
- [4] M. R. Endsley, „A taxonomy of situation awareness errors“, in *Handbook of Aviation Human Factors*, 2nd Hrsg., CRC Press, 1995, pp. 12-1 - 12-24.
- [5] E. C. Adam, W. Martin, D. McRuer, M. Reinecke, V. Schmit, R. Seifert, B. Simon, W. Schwartz, R. van de Graaff und H. Wünnenberg, „Improved Guidance and Control Automation at the Man-Machine Interface“, in *AGARD Advisory Report No. 228*, Neuilly Sur Seine, F, NATO, 1986.
- [6] J. Kellerer, C. Möller, A. Kostka, H. Neujahr und P. Sandl, „Panoramic Displays: The Next Generation of Fighter Aircraft Cockpits“, *SAE International Journal of Aerospace*, Bd. 4(2), pp. 751-761, 2011.
- [7] C. D. Wickens, J. D. Lee, Y. Liu und S. Gordon-Becker, *An Introduction to Human Factors Engineering*, 4 Hrsg., Bd. 2, Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education (Prentice Hall), 2004.
- [8] M. R. Endsley, „Designing for Situation Awareness in Complex Systems“, in *Proceedings of the Second International Workshop on the Symbiosis of Humans, Artifacts and Environment*, Kyoto, J, 2001.
- [9] C. D. Wickens, „Aviation Displays“, in *Principles and Practice of Aviation Psychology*, Mahwah, NJ, USA, Lawrence Earlbaum Associates, 2003, pp. 147-200.
- [10] F. Holzapfel, *Flugsystemdynamik II - Vorlesungsmanuskript*, München, D, 2008.
- [11] DIN EN ISO 19111, *Geoinformation – Koordinatenreferenzsysteme*, Technisches Komitee CEN/TC 211, 2002.
- [12] Mathopedia, „<http://www.mathopedia.de/Koordinatensysteme.aspx>“, 2012. [Online]. [Zugriff am 7. November 2014].
- [13] G. Merziger, G. Mühlbach, D. Wille und T. Wirth, *Formeln und Hilfen zur Höheren Mathematik*, Hannover, D: Binomi Verlag, 2001.
- [14] F. Holzapfel, *Flugsystemdynamik I - Vorlesungsmanuskript*, München, D, 2008.
- [15] D. Harris, *Human Performance on Flight Deck*, Farnham, GB: Ashgate Publishing Limited, 2011.
- [16] H. Z. Tan, F. Barbagli, K. Salisbury, H. Cristy und C. Spence, „Force-Direction Discrimination is not Influenced by Reference Force-Direction“, *Haptics-e*, pp. 1-6, 2006.
- [17] G. Calhoun, P. Le Blaye und H. Welsch, *Pilot-Vehicle Interface*, Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA: Defense Technical Information Center, 2000.
- [18] K. W. Arthur, *Effects of Field of View on Performance with Head-Mounted Displays - Dissertation*, Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina, 2000.
- [19] J. M. Reising, K. K. Ligget und R. C. Munns, „Controls, Displays and Workspace Design“, in *Handbook of Aviation Human Factors*, Mahwah, NJ, USA, Lawrence Erlbaum Associates, 1998, pp. 327-354.
- [20] K. B. Bennett, A. L. Nagy und J. M. Flach, „Human Computer Interaction“, in *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Dayton, OH, USA, John Wiley & Sons Inc., 2012, pp. 1179-1206.
- [21] J. M. Jacobsen und B. Comiskey, „Nonemissive Displays and Piezoelectric Power Supplies“. USA Patent 5930026, 27th July 1999.
- [22] Y.-C. Tsai, Y.-C. Hsu und C.-M. Wu, „Electronic Ink Display“. USA Patent US2007/0195252 A1, 23th August 2007.
- [23] M. Jukes, *Aircraft Display Systems*, Chichester, GB: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [24] J. L. Ferguson, „Display Devices Utilizing Liquid Crystal Light Modulation“. USA Patent 3731986, 8th May 1973.
- [25] A. Hedge, „Ergonomics Considerations of LCD versus CRT Displays“, Cornell University, Cornell, NY, USA, 2003.
- [26] S. Becker, H. Nehjahr, P. Sandl und U. Babst, „Holographische Displays - HOLDIS“, in *DGLR-Bericht*, Darmstadt, D, 2008.

- [27] R. KleeBaur, „Brilliant Colours even in Bright Light“, *Planet Aerospace*, Bd. 3, 2005.
- [28] M. Scheiman, M. Scheiman und S. G. Whittaker, *Low Vision Rehabilitation: A Practical Guide for Occupational Therapists*, Thorofare, NJ, USA: SLACK Inc., 2006.
- [29] S. Wordpress, „<https://simotron.files.wordpress.com/2012/11/airbus-a400m-atlas-cockpit-ec-404.jpg>“, [Online]. [Zugriff am 3. Juli 2016].
- [30] E. C. Adam, „Tactical Cockpits The Coming Revolution“, in *Proceeding of the Telesystems Conference*, St. Louis, MO, USA, 1991.
- [31] T. A. Furness, „The Super Cockpit and Human Factors Challenges“, in *Proceedings of Human Factors Society 30th Annual Meeting*, Santa Monica, CA, USA, 1986.
- [32] Federal Aviation Administration, „Criteria for Approval of Category I and Category II Weather Minima for Approach“, U.S. Department of Transportation, 2002.
- [33] D. C. Foyle, A. Goodman und B. L. Hooey, „NASA Aviation Safety Program Conference on Human Performance Modeling of Approach and Landing with Augmented Displays“, NASA, NASA Ames Research Center, CA, USA, 2003.
- [34] R. V. Parrish, „Aspects of Synthetic Vision Display Systems and the Best Practices of the NASA's SVS Project“, NASA, Langley Research Center, VA, USA, 2008.
- [35] L. J. Prinzel III und J. R. Comstock, „Human Factors Issues in Synthetic Vision Displays: Government, Academic, Military, and Industry Perspectives“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*, Santa Monica, CA, USA, 2004.
- [36] T. Schnell, Y. Kwon und S. Merchant, „Improved Flight Technical Performance in Flight Decks equipped with Synthetic Vision Information System Displays“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 14(1), pp. 79-102, 2004.
- [37] S. Fadden, P. M. Ververs und C. D. Wickens, „Pathway HUDs: Are They Viable?“, *The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 43(2), pp. 173-193, 1st January 2001.
- [38] C. D. Wickens, A. L. Alexander, W. J. Horrey, A. Nunes und T. J. Hardy, „Traffic and Flight Guidance Depiction on a Synthetic Vision System Display: The Effects of Clutter on Performance and Visual Attention Allocation“, University of Illinois, Savoy, IL, USA, 2004.
- [39] C. D. Wickens und C. M. Carswell, „The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design“, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 37(3), pp. 473-494, 1995.
- [40] D. Salomon, *Transformations and Projections in Computer Graphics*, Northridge, CA, USA: Springer-Verlag, 2006.
- [41] I. Carlbom und J. Paciorek, „Planar Geometric Projections and Viewing Transformations“, *Computing Surveys*, Bd. 10(4), pp. 465-502, 4th December 1978.
- [42] A. Sindlinger und U. Klingauf, „Depiction of Large Angles of View in Perspective Flight Guidance Displays through the use of Non-Planar Projections“, in *Proceedings of SPIE Vol. 7328*, San Jose, USA, 2009.
- [43] D. Meschede, *Optik, Licht und Laser*, 3 Hrsg., Berlin, Heildelberg, New York, D: Springer Verlag, 2008.
- [44] Eurofighter Jagdflugzeug GmbH, „<http://www.eurofighter.com/advantages>“, 2014. [Online]. [Zugriff am 11. November 2014].
- [45] C. D. Wickens, M. Vincow und M. Yeh, „Design Applications of Visual Spatial Thinking: The Importance of Frame of Reference“, in *The Cambridge Handbook of Visual Spatial Thinking*, New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2005, pp. 383-425.
- [46] I. P. Howard, „Spatial Vision within Egocentric and Exocentric Frames of Reference“, Institute for Space and Terrestrial Science York University, Toronto, CDN, 1993.
- [47] C. D. Wickens, „Frames of Reference for Navigation“, in *Attention and Performance XVII: Cognitive Regulation of Performance: Interaction of Theory and Application*, Cambridge, MA, USA, MIT Press, 1999, pp. 113-144.
- [48] T. T. Prevett, „Prespective Displays and Frame of Reference: Their Independence to realize Performance Advantages over Planar Displays in a Terminal Area Navigation Task“, University of Illinois, Savoy, IL, USA, 1994.
- [49] C. R. Rate, „Map Dimensionality and Frame of Reference for Terminal Area Navigation Displays: Where do we go from here?“, Univeristy of Illinois, Savoy, IL, USA, 1993.

- [50] E. B. Goldstein, *Wahrnehmungspsychologie*, 2 Hrsg., Heidelberg, Berlin, D: Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [51] J. J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*, New York, NY, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 1986.
- [52] E. B. Goldstein, *Sensation and Perception*, 8 Hrsg., Belmont, MA, USA: Cengage Learning, 2006.
- [53] J. Nielsen und K. Pernice, *Eyetracking Web Usability*, Berkely, CA, USA: Nielsen Norman Group, 2001.
- [54] H.-W. Hunziker, *Im Auge des Lesers*, Zürich, CH: Stäubli Verlag AG, 2006.
- [55] E. B. Werner und C. G. Rossi, *Manual of Visual Fields*, University of Michigan, MI, USA: Churchill Livingstone, 1991.
- [56] H. Gross, *Handbook of Optical Systems*, Weinheim, D: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2008.
- [57] MIL-STD-1472G, *Human Engineering*, Department of Defense and Design Criteria Standard, 1999.
- [58] M. W. McGreevy und S. R. Ellis, „Format and Basic Geometry of a Perspective Display of Air Traffic for the Cockpit“, NASA, Ames Research Center, CA, USA, 1991.
- [59] M. R. Endsley, „Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)“, Northrop Aircraft, Hawthorne, CA, USA, 1988.
- [60] D. B. Beringer und P. A. Hancock, „Summary of Various Definitions of Situation Awareness“, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Aviation Psychology*, Ohio State University, OH, USA, 1989.
- [61] M. R. Endsley, „Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review“, Lawrence Erlbaum Association, Mahwah, NJ, USA, 2000.
- [62] A. Kostka, C. Möller, H. Neujahr und A. Zimmer, „Determining Workload Profiles of Military Jet Pilots for Display Assessments“, in *Conference Proceedings of Human Computer Interaction in Aerospace*, Brüssel, B, 2012.
- [63] M. R. Endsley, „Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems“, *Human Factors*, pp. 32-64, 1995.
- [64] E. K. Muthard und C. D. Wickens, „Compensation for Display Enlargement in Flight Control and Surveillance“, NASA, Ames Research Center, CA, USA, 2004.
- [65] D. S. Tan, D. Gergle, P. G. Scupelli und R. Pausch, „With Similar Visual Angles, Larger Displays Improve Spatial Performance“, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2003.
- [66] A. L. Alexander, C. D. Wickens und T. J. Hardy, „Examining the Effects of Guidance Symbology, Display Size, and Field of View on Flight Performance and Situation Awareness“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting*, Santa Monica, CA, USA, 2003.
- [67] D. S. Tan, D. Gergle, P. Scupelli und R. Pausch, „Physically Large Displays Improve Performance on Spatial Tasks“, in *Proceedings of ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2006.
- [68] B. E. Riecke, J. Schulte-Pelkum und H. H. Bülthoff, „Perceiving Simulated Ego-Motions in Virtual Reality - Comparing Large Screen Displays with HMDs“, in *SPIE - Invited Symposium on VALVE: Vision, Action, and Locomotion in Virtual (and Real) Environments*, San Jose, CA, USA, 2005.
- [69] M. St. John, M. B. Cowen, H. S. Smallman und H. M. Oonk, „The Use of 2D and 3D Displays for Shape-Understanding versus Relative-Position Tasks“, *Human Factors*, Bd. 43(1), pp. 79-98, 2001.
- [70] C. D. Wickens und T. T. Prevett, „Exploring the Dimensions of Egocentricity in Aircraft Navigation Displays“, *Journal of Experimental Psychology*, Bd. 1(2), pp. 110-135, 1995.
- [71] Wickens, Christopher D., S. Fadden, D. Merwin und P. M. Ververs, „Cognitive Factors in Aviation Display Design“, in *Proceedings of the 17th Digital Avionic System Conference*, Seattle, WA, USA, 1998.
- [72] Y. Yeh und L. D. Silverstein, „Spatial Judgements with Monoscopic and Stereoscopic Presentation of Perspective Displays“, *Human Factors*, Bd. 34(5), pp. 583-600, 1992.
- [73] S. N. Roscoe, „Airborne Displays for Flight and Navigation“, *Human Factors*, Bd. 10(4), pp. 321-332, 1968.
- [74] A. D. Andre und C. D. Wickens, „When Users Want What's not Best for Them“, *Ergonomics in Design*, pp. 10-14, October 1995.
- [75] J. S. Tittle, D. D. Woods und A. Roesler, „The Role of 2-D and 3-D Task Performance in the Design and Use of Visual Displays“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting*, San Francisco, CA, USA, 2001.

- [76] M. St. John und M. B. Cowen, „Use of Perspective View Displays for Operational Tasks“, SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 1999.
- [77] M. Tory, T. Möller, M. S. Atkins und A. E. Kirkpatrick, „Combining 2D and 3D Views for Orientation and Relative Position Tasks“, in *Conference of Human Factors in Computing Systems*, Wien, A, 2004.
- [78] C. D. Wickens, D. H. Merwin und E. L. Lin, „Implications of Graphics Enhancement for the Visualization of Scientific Data: Dimensional Integrality, Motion and Mesh“, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 36(1), pp. 44-61, 1994.
- [79] I. D. Haskell und C. D. Wickens, „Two- and Three Dimensional Displays for Aviation: A Theoretical and Empirical Comparison“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 3(2), pp. 87-109, 1993.
- [80] J. J. Adams, „Simulator Study of a Pictorial Display for General Aviation Instrument Flight“, NASA, Langley Research Center, VA, USA, 1982.
- [81] D. R. Weller, Predictor Displays as Training Aids in Carrier Landings, Orlando, FL, USA: Defense Technical Information Center, 1983.
- [82] L. J. Prinzel III, L. J. Kramer, J. J. Arthur und R. E. Bailey, „Multi-Dimensionality of Synthetic Vision Cockpit Displays: Prevention of Controlled-Flight-Into-Terrain“, NASA, Langley Research Center, VA, USA, 2006.
- [83] L. C. Thomas und C. D. Wickens, „Display Dimensionality and Conflict Geometry Effects on Maneuver Preferences for Resolving In-Flights Conflicts“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*, Seattle, USA, 2005.
- [84] A. L. Alexander, C. D. Wickens und D. H. Merwin, „Perspective and Coplanar Cockpit Displays of Traffic Information: Implications for Maneuver Choice, Flight Safety, and Mental Workload“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 15(1), pp. 1-21, 2005.
- [85] A. Rabl, H. Neujahr, A. Zimmer und C. Möller, „Exploring Pilot's Gaze Patterns: Display Design Based on Gaze Strategies“, in *EAAP Conference Proceedings 2014*, Valetta, M, 2014.
- [86] S. V. Bemis, J. L. Leeds und E. A. Winer, „Operator Performance as a Function of Type of Display: Conventional versus Perspective“, *Human Factors*, Bd. 30(2), pp. 163-169, 1988.
- [87] L. van Breda und H. A. Veltman, „Perspective Information in the Cockpit as a Target Acquisition Aid“, *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Bd. 4(1), pp. 55-68, 1998.
- [88] F. H. Previc und W. R. Ericoline, „The "Outside-In" Attitude Display Concept Revisited“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 9(4), pp. 377-401, 1999.
- [89] S. L. Johnson und S. N. Roscoe, „What moves, the Airplane or the World“, University of Illinois, Savoy, IL, USA, 1970.
- [90] O. Olmos, C.-C. Liang und C. D. Wickens, „Electronic Map Evaluation in Simulated Visual Meteorological Conditions“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 7(1), pp. 37-66, 1997.
- [91] L. Gugerty und W. Rodes, „A Cognitive Model of Strategies for Cardinal Direction Judgements“, *Spatial Condition and Computation*, Bd. 7, pp. 179-212, 2007.
- [92] A. J. Aretz, „The Design of Electronic Map Displays“, *Human Factors*, Bd. 33(1), pp. 85-101, 1991.
- [93] R. L. Klatzky, „Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions and Interconnections“, Carnegie Mellon University, Lecture Notes, Pittsburgh, PA, USA, 1998.
- [94] I. P. Howard, „Spatial Vision within Egocentric and Exocentric Frames of Reference“, in *Pictorial communication in virtual and real environments*, London, GB, Taylor & Francis, 1991, pp. 338-358.
- [95] A. J. Aretz und C. D. Wickens, „The Mental Rotation of Map Displays“, in *Human Performance*, University of Illinois, USA, Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1992, pp. 303-328.
- [96] C. D. Wickens, „Situation Awareness: Impact of Automation and Display Technology“, in *Situation Awareness: Limitations and Enhancement in the Aviation Environment*, Neuilly-sur-Seine, F, AGARD, 1995, pp. 96-108.
- [97] K. Harwood, „Cognitive Perspectives on Map Displays for Helicopter Flight“, in *Proceedings of 33rd Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Denver, CO, USA, 1989.
- [98] W. Rodes und L. Gugerty, „Effects of Electronic Map Displays and Individual Differences in Ability of Navigation Performance“, *Human Factors*, Bd. 54(4), pp. 589-599, 2012.
- [99] O. Olmos, C. D. Wickens und A. Chudy, „Tactical Displays for Combat Awareness: An Examination of Dimensionality and Frame of Reference Concepts and the Application of Cognitive Engineering“, Bd. 10(3), pp. 247-271, 13th November 2000.

- [100] S. M. Doherty und C. D. Wickens, „An Analysis of the Immersed Perspective Flight Path Display Benefit: Benefits of Review, Prediction, and Frame of Reference“, NASA, Ames Research Center, CA, USA, 2000.
- [101] E. P. McCormick, C. D. Wickens, R. Blanks und M. Yeh, „Frame of Reference Effects on Scientific Visualization Subtasks“, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 40(3), pp. 443-451, 1st September 1998.
- [102] W. Barfield, C. Rosenberg und T. A. Furness III, „Situation Awareness as a Function of Frame of Reference, Computer-Graphics Eyepoint Elevation, and Geometric Field of View“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 5(3), pp. 233-256, 1995.
- [103] C. D. Wickens, S. Todd und K. Seidler, „Three-Dimensional Displays: Perception, Implementation, Applications“, University of Illinois, Savoy, IL, USA, 1989.
- [104] C. D. Wickens, C.-C. Liang, T. Prevett und O. Olmos, „Egocentric and Exocentric Displays for Terminal Area Navigation“, in *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, CA, USA, 1994.
- [105] L. C. Thomas, C. D. Wickens und J. Merlo, „Immersion and Battlefield Visualization: Frame of Reference Effects on Navigation Tasks and Cognitive Tunneling“, University of Illinois, Savoy, IL, USA, 1999.
- [106] L. C. Thomas und C. D. Wickens, „Visual Displays and Cognitive Tunneling: Frames of Reference Effects on Spatial Judgement and Change Detection“, in *Proceedings of 45th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, USA, 2001.
- [107] C. D. Wickens, „The When and How of using 2-D and 3-D Displays for Operational Tasks“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 2000*, Santa Monica, CA, USA, 2000.
- [108] J. D. Prothero und H. G. Hoffman, „Widening the Field-of-View Increases the Sense of Presence in Immersive Virtual Environments“, University of Washington, Seattle, WA, USA, 1995.
- [109] J. J.-W. Lin, H. B. Duh, D. E. Parker, H. Abi-Rached und T. A. Furness, „Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment“, University of Washington, Seattle, WA, USA, 2002.
- [110] M. W. McGreevy und S. R. Ellis, „The Effect of Perspective Geometry on Judged Direction in Spatial Information Instruments“, *Human Factors*, Bd. 28(4), pp. 439-456, 1986.
- [111] F. Steinicke und G. Bruder, „Visual Perception of Perspective Distortions“, Universität Würzburg, Würzburg, D, 2012.
- [112] J. Psotka und S. A. Lewis, „Effects of Field of View on Judgements of Self-Location: Distance Estimations Using Planview Representations as a Function of Observer Eye Station Points (ESP) and Geometric Field of View (FOVg)“, U.S. Army Research Institute, Alexandria, VA, USA, 1998.
- [113] A. Sindlinger, *Ein Beitrag zur dreidimensionalen Darstellung von Nominal-Trajektorien in perspektivischen Flugführungsanzeigen - Dissertation*, Darmstadt, D: TU Darmstadt, 2008.
- [114] R. V. Parrish, A. M. Busquets, S. P. Williams und D. E. Nold, „Spatial Awareness Comparisons Between Large-Screen, Integrated Pictorial Displays and Conventional EFIS Displays During Simulated Landing Approaches“, NASA, Langley Research Center, VA, USA, 1994.
- [115] M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston und M. Young, „Measurement and Modeling of Depth Cue Combination: in Defense of Weak Fusion“, *Vision Res*, Bd. 35, pp. 389-412, 1995.
- [116] C. Hendrix und W. Baarfield, „Relationship between Monocular and Binocular Depth Cues for Judgements of Spatial Information and Spatial Instrument Design“, *Displays*, Bd. 16(3), pp. 103-113, 1995.
- [117] H. S. Smallman, E. Schiller und M. B. Cowen, „Track Location Enhancements for Perspective View Displays“, SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 2000.
- [118] M.-J. Liao und W. W. Johnson, „Characterizing the Effects of Droplines on Target Acquisition Performance on a 3-D Perspective Display“, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 46(3), pp. 476-496, 2004.
- [119] H. S. Smallman, E. Schiller und C. Mitchell, „Designing a Display for the Area Air Defense Commander“, SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 1999.
- [120] H. S. Smallman, H. St. John, H. M. Oonk und M. B. Cowen, „Track Recognition Using Two-Dimensional Symbols or Three-Dimensional Realistic Icons“, SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 2000.
- [121] H. S. Smallman, H. M. Oonk, M. St. John und M. B. Cowen, „Symbicons: Advanced Symbolology for Two-Dimensional and Three-Dimensional Displays“, SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 2001.

- [122] P. Andersson und T. Alm, „Perception Aspects on Perspective Aircraft Displays“, *Displays*, Bd. 24, pp. 1-13, 2003.
- [123] P. C. Schuttle und A. C. Trujillo, „Flight Crew Task Management in Non-Normal Situations“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th Annual Meeting*, Philadelphia, PA, USA, 1996.
- [124] J. Kellerer, *Untersuchung zur Auswahl von Eingabeelementen für Großflächendisplays in Flugzeugcockpits - Dissertation*, Darmstadt, D: TU Darmstadt, 2010.
- [125] J. Kellerer, A. Eichinger, P. Sandl und U. Klingauf, „Panoramic Displays - Anzeige- und Bedienkonzept für die nächste Generation von Flugzeugcockpits“, in *DGLR-Bericht - Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration*, Bonn, D, 2008.
- [126] N. A. Stanton, P. M. Salmon, G. H. Walker, C. Baber und D. P. Jenkins, *Human Factors Methods - A Practical Guide for Engineering and Design*, Hampshire, GB: Ashgate Publishing Limited, 2005.
- [127] C. Jacobs, *Digitale Panoramen - Tipps, Tricks und Techniken für die Panoramafotografie*, Heidelberg, D: Springer Verlag, 2004.
- [128] W. Uricchio, „A ‘Proper Point of View’: The Panorama and some of its early Media Iterations“, *Early Popular Visual Culture*, Bd. 9(3), pp. 225-238, 2011.
- [129] J. Ellerbroek, M. Visser, S. B. van Dam, M. Mulder und M. M. van Paassen, „Design of an Airborne Three-Dimensional Separation Assistance Display“, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Anchorage, AK, USA, 2011.
- [130] G. A. Sexton, „Cockpit-Crew Systems Design and Integration“, in *Human Factors in Aviation*, San Diego, CA, USA, Gulf Professional Publishing, 1988, pp. 495-526.
- [131] C. D. Wickens und C. M. Carswell, „Information Processing“, in *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Bd. 4, Mahwah, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 117-161.
- [132] Military Aerospace, „<http://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-21/issue-9/news/news/panoramic-display.html>“, 2013. [Online]. [Zugriff am 14. Juli 2013].
- [133] Flight Global, „<http://www.flightglobal.com/news/articles/boeing-to-offer-f-35-like-cockpit-display-for-super-342845/>“, [Online]. [Zugriff am 13. November 2014].
- [134] Garmin, „<https://buy.garmin.com/shop/shop.do?cID=153&pID=66916>“, [Online]. [Zugriff am 13. November 2014].
- [135] C. J. Arbak, N. Schwartz und G. Kuperman, „Evaluating the Panoramic Cockpit Controls and Displays System“, McDonnell Douglas Astronautics Co., St. Louis, MO, USA, 1987.
- [136] R. Gardner, „Torward Cockpit 3.0“, *Aerospace*, pp. 4-8, 2010.
- [137] M. Spinoni, A. E. Wadlow, E. Luceron und P. Hahn, „EFA Cockpit Description“, Eurofighter GmbH, Turin, I, 1986.
- [138] S. Kerschenlohr, *Bedienkonzept für großflächige Displays in hochagilen Flugzeugen - Diplomarbeit*, München, D: TU München, 2007.
- [139] J. Ritzer, *Entwicklung haptisch codierter Rahmenleisten für großflächige Touchscreendisplays in hochagilen Flugzeugen - Diplomarbeit*, Deggendorf, D: Hochschule Deggendorf, 2008.
- [140] C. Möller, M. Opitz, A. Kostka und N. Kornau, „Datenhandschuh mit taktiler Rückmeldung und Verfahren“. Patent EP 12772201 A 20120904, 29 September 2011.
- [141] C. Möller, A. Kostka, H. Neujahr und U. Klingauf, „Enhancing Situational Awareness by Perspective Panoramic Information Presentation“, in *EAAP Conference Proceedings 2012*, Villasimius, I, 2012.
- [142] C. Möller, A. Kostka, H. Neujahr und J. Kellerer, „Panoramic Display: Der Einfluss weitwinkliger Blickfelder auf das Raumverständnis von Piloten“, in *DGLR-Bericht 2012-01 Fortschrittliche Anzeigesysteme für die Fahrzeug- und Prozessführung*, Koblenz, D, 2012.
- [143] DIN EN ISO 9241-110, *Ergonomische Anforderungen der MenschSystemInteraktion - Teil 110: Grundsätze der Displaygestaltung*, 2004.
- [144] T. Evreinova und R. Raisamo, „An Evaluation of Color Patterns for Imaging of Warning Signals in Cockpit Displays“, in *Proceedings of the Second Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, Aarhus, DK, 2002.
- [145] R. Rothrock und V. Martz, „Good Screen Design“, Vista Control Systems Inc., 1995.
- [146] V. Bogachev, *Enhancement of a Synthetic Vision for Panoramic Displays - Master Thesis*, Sofia, BG: TU Sofia, 2012.

- [147] Eurofighter GmbH, „Eurofighter Aircrew Training Manual - Eurofighter Production Aircraft Twin-Seat Batch 1“, 2003.
- [148] S. Kunze, *Modifikation und Erweiterung einer synthetischen Außensicht zur Geländedarstellung - Diplomarbeit*, München, D: TU München, 2011.
- [149] M. Simhofer, *Implementierung einer synthetischen Außensicht für großflächige Displays - Diplomarbeit*, St. Pölten, A: FH St. Pölten, 2009.
- [150] P. Hadwiger, *Perspektivische Displays in hochagilen Flugzeugen - Diplomarbeit*, München, D: TU München, 2007.
- [151] A. Rabl, *Bewertung räumlicher Anzeigen im Flugzeugcockpit - Dissertation*, Regensburg, 2016 (in press).
- [152] V. J. Gawron, *Human Performance, Workload, and Situation Awareness Measures Handbook*, Bd. 2, Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, 2008.
- [153] M. R. Endsley, „Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement“, in *Proceedings of the Human Factors Society - 32nd Annual Meeting*, Santa Monica, CA, USA, 1988.
- [154] M. R. Endsley und S. J. Selcon, „A Comparative Analysis of SAGAT and SART for Evaluations of Situation Awareness“, in *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Chicago, IL, USA, 1998.
- [155] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research“, North Holland Press., Amsterdam, NL, 1988.
- [156] J. Scheiderer, *Angewandte Flugleistung*, Heidelberg, D: Springer Verlag, 2008.
- [157] Airpower AT, „<http://eurofighter.airpower.at/technik-daten.htm>“, 2013. [Online]. [Zugriff am 12. November 2014].
- [158] PRESAGIS, „VAPS XT User's Guide - Version 3.1.2“, Presagis, Montréal, CDN, 2009.
- [159] J. Bortz, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, Berlin, D: Springer Verlag, 2005.
- [160] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, New York, San Francisco, USA, London, GB : Academic Press, 1977.
- [161] S. J. Landry, „Human Factors and Ergonomics in Aviation“, in *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Purdue University, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 1667-1688.
- [162] B. Kuntz, „Implementierung einer Flugsimulationsumgebung zur Untersuchung verschiedener räumlicher Anzeigeformate - Projektbericht“, Cassidian, Manching, D, 2013.
- [163] R. N. Shepard und J. Metzler, „Mental Rotation of Three-Dimensional Objects“, *Science*, pp. 701-703, 19 February 1971.
- [164] SpatialLearning, „<http://spatiallearning.org/index.php/testsainstruments#LSM>“, Shepard and Metzler. [Online]. [Zugriff am 17. November 2014].
- [165] Paradigm, „<http://www.pdgm.com/>“, 2014. [Online]. [Zugriff am 12. November 2014].
- [166] C. D. Wickens, „Multiple Resources and Performance Prediction“, in *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Savoy, IL, USA, 2002.
- [167] M. Koecher und A. Krieg, *Ebene Geometrie*, Aachen, D: Springer-Verlag, 2007.
- [168] A. Filler, *Euklidische und Nichteuklidische Geometrie*, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, D: BI Wissenschaftsverlag, 1993.
- [169] The Free Dictionary, „<http://www.thefreedictionary.com>“, [Online]. [Zugriff am 11th November 2014].
- [170] B. Hofmann-Wellenhof und H. Moritz, *Physical Geodesy*, New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [171] Wortbedeutung, „<http://www.wortbedeutung.info/Panorama/>“, 2012. [Online]. [Zugriff am 13th March 2013].

Anhang A – Mathematische Herleitungen

1. Krümmung der Horizontallinie in einem egozentrischen Panoramaformat in Abhängigkeit des Flugzeugnick- und –rollwinkels:

Bildung des kartesischen Normalenvektors der Ebenengleichung tangential zur Erdoberfläche im lokalen NED-Bezugssystem (Index 0):

$$\bar{n}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Bildung des Normalenvektors der Ebenengleichung tangential zur Erdoberfläche im lokalen Flugzeugbezugssystem (Index 0):

$$\begin{aligned} - \text{Transformationsmatrix Flugzeug-Rollwinkel:} & \quad M_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_{AC} & \sin \phi_{AC} \\ 0 & -\sin \phi_{AC} & \cos \phi_{AC} \end{bmatrix} \\ - \text{Transformationsmatrix Flugzeug-Nickwinkel:} & \quad M_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta_{AC} & 0 & -\sin \theta_{AC} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{AC} & 0 & \cos \theta_{AC} \end{bmatrix} \\ - \text{Transformationsmatrix Flugzeug-Gierwinkel:} & \quad M_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\bar{n}_{AC} = M_X \cdot M_Y \cdot M_Z \cdot \bar{n}_0$$

$$\bar{n}_{AC} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_{AC} \\ \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \\ \cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \end{pmatrix}_{AC}$$

Aufstellen der Ebenengleichung in Hesse'scher Normalenform mit dem Verlauf durch den Ursprung des Koordinatensystems (d = 0):

$$\bar{n}_{AC} \cdot \bar{x}_{AC} - \bar{d}_{AC} = 0$$

$$\bar{n}_{AC} \cdot \bar{x}_{AC} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_{AC} \\ \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \\ \cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \end{pmatrix}_{AC} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{AC} = 0$$

Transformation von kartesischen Koordinaten in Kugelkoordinaten im lokalen Flugzeugbezugssystem – der Elevationswinkel θ wird auf die xy-Ebene referenziert und nicht auf die z-Achse (Verschiebung um $\pi/2$):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{AC} = \begin{pmatrix} r \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos \psi \\ r \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \psi \\ r \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \end{pmatrix}_{AC}$$

Darstellung in Kugelkoordinaten des lokalen Flugzeugbezugssystems:

$$-\sin \theta_{AC} \cdot \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \cos \psi + \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \cdot \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \psi + \cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \cdot \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) = 0$$

Implizite Darstellung nach θ auflösen:

$$\frac{\sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)}{\cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)} = \frac{-\cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC}}{-\sin \theta_{AC} \cdot \cos \psi + \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \cdot \sin \psi}$$

$$\theta - \frac{\pi}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{-\cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC}}{-\sin \theta_{AC} \cdot \cos \psi + \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \cdot \sin \psi} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC}}{\sin \theta_{AC} \cdot \cos \psi - \sin \phi_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} \cdot \sin \psi} \right) + \frac{\pi}{2}$$

Mit:

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2} \quad \begin{array}{ll} \text{für} & \phi_{AC} = \pm \frac{\pi}{2} \\ \text{oder} & \theta_{AC} = \pm \frac{\pi}{2} \end{array}$$

$$\theta = 0 \quad \text{für} \quad \psi = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_{AC}}{\sin \phi_{AC}} \right)$$

2. Ableitung des Verlaufs von Hauptfluchtlinien entlang des Bodens in einer horizontalen Entfernung D, betrachtet aus einer Flughöhe h:

Hauptfluchtlinien am Boden werden aus in Punkt 1. hergeleiteter Formel abgeleitet. Das Kugelkoordinatensystem ist im NED-Bezugssystem ausgerichtet. Die Hauptfluchtlinien entsprechen Schnittlinien zwischen der Horizontalebene und einer Hilfsebene, die durch den Koordinatensystemursprung verläuft und um einen der Hauptachsenwinkel θ_{FL} oder ϕ_{FL} rotiert wurde.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi_{FL} \cdot \cos \theta_{FL}}{\sin \theta_{FL} \cdot \cos \psi - \sin \phi_{FL} \cdot \cos \theta_{FL} \cdot \sin \psi} \right) + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Hauptachse 1:} \quad \theta_{FL} = 0 \quad \text{und} \quad \phi_{FL} = \pm \tan^{-1} \left(\frac{h}{D} \right)$$

$$\text{Hauptachse 2:} \quad \theta_{FL} = \pm \tan^{-1} \left(\frac{h}{D} \right) \quad \text{und} \quad \phi_{FL} = 0$$

$$\text{Beschränkung:} \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \theta_{MaxDistanz}$$

Die Vereinfachung ergibt:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm 1}{\tan \phi_{FL} \cdot \sin \psi} \right) + \frac{\pi}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{\pm D}{h \cdot \sin \psi} \right) + \frac{\pi}{2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm 1}{\tan \theta_{FL} \cdot \cos \psi} \right) + \frac{\pi}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{\pm D}{h \cdot \cos \psi} \right) + \frac{\pi}{2}$$

Anhang B – Fragebögen

SART

Bitte bewerten Sie für das aktuelle Szenario ihr(en) ...

	NIEDRIG					HOCH	
	1	2	3	4	5	6	7
... Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen							

	NIEDRIG					HOCH	
	1	2	3	4	5	6	7
... Verfügbarkeit von Aufmerksamkeitsressourcen							

	NIEDRIG					HOCH	
	1	2	3	4	5	6	7
... Verständnis der Situation							

NASA TLX

Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z. B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erforderte sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?

gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?

gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Zeitliche Anforderung

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgabe oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?

gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Ausführung der Aufgaben

Wie erfolgreich haben Sie ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser

gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Frustration

Wie unsicher, entmutigt, initiiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?

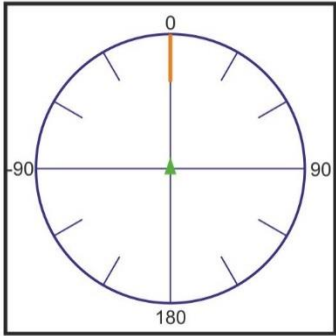
gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hoch

Anhang C – Eingabemasken Sequenz 1. Versuch

Eingabe des Azimutwertes (kontrastoptimierte Abbildung):

Please insert the
CURRENT POSITION of object **C**

Azimuth

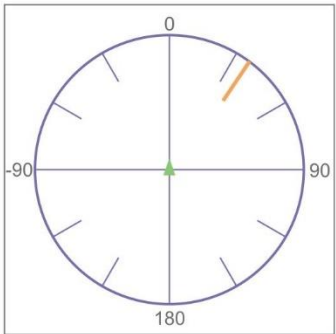


A circular azimuth scale with a black border. The scale is divided into four quadrants by a horizontal and vertical line. The top is labeled '0', the right is '90', the bottom is '180', and the left is '90'. There are tick marks every 15 degrees. A green dot is at the center. An orange line segment is positioned vertically at the 0-degree mark.

Eingabe des Entfernungswertes (kontrastoptimierte Abbildung):

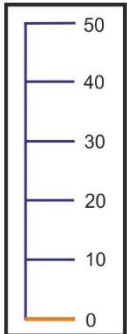
Please insert the
CURRENT POSITION of object **C**

Azimuth



A circular azimuth scale with a black border. The scale is divided into four quadrants by a horizontal and vertical line. The top is labeled '0', the right is '90', the bottom is '180', and the left is '90'. There are tick marks every 15 degrees. A green dot is at the center. An orange line segment is positioned at approximately 45 degrees.

Range

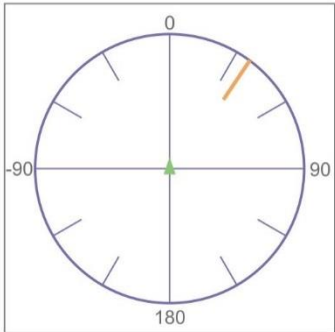


A vertical range scale with a black border. It has a horizontal line with tick marks at 0, 10, 20, 30, 40, and 50. An orange line segment is positioned at the 0 mark.

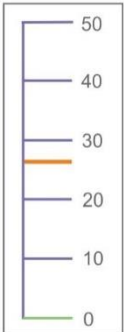
Eingabe des Höhenwertes (kontrastoptimierte Abbildung):

Please insert the **CURRENT POSITION** of object C

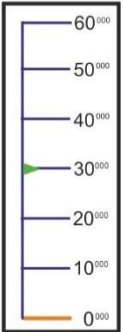
Azimuth



Range



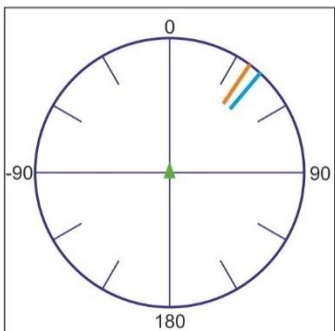
Height



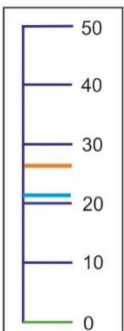
Darstellung des Feedbacks bei Trainingsdurchläufen (kontrastoptimierte Abbildung):

Please insert the **CURRENT POSITION** of object C

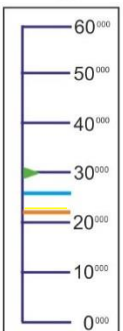
Azimuth



Range



Height



Continue

Anhang D – Ergebnistabellen 1. Versuch

Raumformat		2D		EXO		PAN	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Wiedergabe- fehler [-]	Azimet	0,15468357	0,00995107	0,12307791	0,00784304	0,15014251	0,00965318
	Entfernung	0,12891831	0,00462403	0,12684198	0,00419761	0,13106647	0,00537407
	Höhe	0,14331222	0,00915406	0,13942712	0,00650786	0,15361482	0,00752721
Wiedergabe- zeit [s]	Azimet	4,39991549	0,27268457	4,18004373	0,27167015	5,3974817	0,40903153
	Entfernung	3,00819718	0,14591211	3,0741691	0,15586746	3,29904832	0,25910393
	Höhe	3,82566197	0,27287949	3,06472303	0,26888909	3,07774524	0,25957841

Objektanzahl		2		4		6	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Wiedergabe- fehler [-]	Azimet	0,08760994	0,00675639	0,13434549	0,00648311	0,20853861	0,01296701
	Entfernung	0,09141851	0,00604589	0,13512452	0,00391467	0,1618435	0,00502125
	Höhe	0,08845031	0,00777518	0,15874518	0,00577637	0,19145557	0,00763674
Wiedergabe- zeit [s]	Azimet	4,27941094	0,20948353	4,79386197	0,35146178	4,90816058	0,27372894
	Entfernung	3,27597475	0,1689339	3,20414097	0,15798992	2,89074453	0,12706166
	Höhe	3,29692847	0,16218614	3,59851689	0,34614876	3,0940438	0,25861063

Fragentyp		Akt		Zuk	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Wiedergabe- fehler [-]	Azimet	0,11273032	0,0078301	0,17424537	0,00978266
	Entfernung	0,1154203	0,00485372	0,14311015	0,00457164
	Höhe	0,14410676	0,0066259	0,14678622	0,00634966
Wiedergabe- zeit [s]	Azimet	4,41802632	0,2045562	4,90359606	0,35735017
	Entfernung	3,03450188	0,14219157	3,22092611	0,15023049
	Höhe	3,22608083	0,22681258	3,43662069	0,24597043

Raumformat x Objektanzahl			2D		EXO		PAN	
			Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Wieder- gabe- fehler [-]	2	Azimet	0,09607764	0,01169781	0,06707618	0,00408403	0,09960455	0,01041018
		Entfernung	0,09405105	0,00812157	0,07858059	0,00553168	0,10160169	0,00798912
		Höhe	0,08206105	0,0114024	0,08036087	0,00644347	0,10298293	0,01049447
	4	Azimet	0,12498808	0,01035821	0,13728122	0,01140964	0,14117793	0,01183545
		Entfernung	0,12711176	0,00549191	0,15160265	0,00777469	0,12675315	0,00367504
		Höhe	0,16390546	0,01192111	0,14802183	0,01014203	0,16424577	0,00827461
	6	Azimet	0,24260738	0,01847446	0,16820105	0,01706202	0,21249802	0,01661248
		Entfernung	0,16569496	0,00512711	0,15303946	0,00532902	0,16651607	0,01119089
		Höhe	0,18466015	0,01208932	0,19349121	0,01071035	0,15361482	0,00905067
Wieder- gabe- zeit [s]	2	Azimet	3,99573222	0,15208867	4,05814346	0,23470811	4,78675105	0,40794127
		Entfernung	3,22376569	0,18940112	3,33827004	0,20313735	3,26632911	0,27715104
		Höhe	3,70464435	0,23128569	3,09953586	0,19396498	3,08316456	0,26498044
	4	Azimet	4,72008584	0,47933156	4,13141593	0,31202325	5,54567568	0,43386189
		Entfernung	3,00738197	0,15261054	3,11827434	0,21548662	3,49806306	0,31989369
		Höhe	4,18193133	0,4385408	3,37159292	0,4521424	3,21720721	0,31191139
	6	Azimet	4,49235294	0,31656352	4,35887892	0,37058144	5,89678571	0,45377076
		Entfernung	2,79252101	0,1883072	2,74878924	0,14365239	3,13642857	0,20590366
		Höhe	3,59840336	0,31972538	2,71672646	0,29246899	2,93379464	0,30494395

Raumformat x Fragentyp			2D		EXO		PAN	
			Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Wieder- gabe- fehler [-]	Akt	Azimet	0,12689419	0,01461892	0,0913132	0,00752065	0,12006597	0,01120922
		Entfernung	0,11890393	0,00584262	0,11138258	0,00438983	0,11598068	0,00755993
		Höhe	0,14046582	0,01024315	0,12965652	0,00670295	0,16240351	0,00709253
	Zuk	Azimet	0,18262994	0,01268197	0,15734529	0,01327087	0,18212722	0,01176466
		Entfernung	0,13898927	0,00581947	0,14351939	0,00684099	0,14710937	0,0060199
		Höhe	0,14617471	0,00979398	0,14996751	0,00763178	0,14426854	0,00867015
Wieder- gabe- zeit [s]	Akt	Azimet	4,23129213	0,17684177	4,00935393	0,2556064	5,02019886	0,37867385
		Entfernung	2,9855618	0,14161357	2,95966292	0,16348118	3,1596875	0,26193832
		Höhe	3,66182584	0,28334108	2,99634831	0,2564913	3,01772727	0,26818695
	Zuk	Azimet	4,56949153	0,39265438	4,36418182	0,30525846	5,79870091	0,49597025
		Entfernung	3,03096045	0,15939111	3,19769697	0,17293292	3,44725076	0,27523477
		Höhe	3,99042373	0,27401293	3,13848485	0,29604071	3,141571	0,27278033

Anhang

SART [1...7]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Bedarf an Aufm. (BA)	6,26388889	0,09936315	5,79166667	0,14811526	6,05555556	0,10527608
Verfügbarkeit von Aufm. (VA)	2,56944444	0,39432972	2,94444444	0,37230136	2,91666667	0,45296442
Verständnis der Situation (VS)	4,18055556	0,36437434	4,65277778	0,37964759	4,5	0,36698792

NASA TLX [0...100]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Geistige Anforderung (GA)	82,58333333	1,83143841	78,59722222	2,38528548	80,19444444	1,95561366
Körperliche Anforderung (KA)	19,05555556	5,24084633	16,18055556	4,3575208	16,59722222	3,62304506
Zeitliche Anforderung (ZA)	75	3,61190745	70,94444444	4,73063718	72,11111111	4,04890835
Aufgabenausführung (AA)	33,5138889	3,9349433	43,83333333	3,75983559	41,19444444	3,44673474
Anstrengung (AN)	76,84722222	3,09667862	73,31944444	4,40597898	75,86111111	3,47912445
Frustration (FR)	58,1388889	3,48414116	50,23611111	3,28073773	49,2777778	4,48863761

Ranking Raumformat [1...3]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Rangpunkte	2,916666	0,083333	1,75	0,179435	1,333333	0,142134

Anhang E – Ergebnistabellen 2. Versuch

Raumformat	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Fehlerrate [-]	0,346875	0,01714602	0,3359375	0,01947555	0,3753125	0,01661536
Detektionszeit [s]	8,01444544	0,24742282	7,09246426	0,29300407	7,32762423	0,32798187

Nebenaufgabe	GL		MR		VS		VG	
	Mittelw.	Std. F.	Mittelw.	Std. F.	Mittelw.	Std. F.	Mittelw.	Std. F.
Fehlerrate [-]	0,285	0,01574	0,393333	0,018343	0,39375	0,016968	0,33875	0,0174
Detektionszeit [s]	7,312	0,25014	7,38249	0,287261	7,76163	0,267267	7,45066	0,2868

Schwierigkeit	E		S	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Fehlerrate [-]	0,2825	0,015057039	0,422916667	0,017433011
Detektionszeit [s]	7,096380007	0,246520435	7,943335627	0,266487578

Raumformat x Schwierigkeit		2D		EXO		PAN	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Fehlerrate [-]	Einfach	0,26125	0,01592217	0,279375	0,02021853	0,306875	0,0170181
	Schwer	0,4325	0,02050629	0,3925	0,02277394	0,44375	0,01930599
Detektionszeit [s]	Einfach	7,57848542	0,24088214	6,76998494	0,29898288	6,9315776	0,32031094
	Schwer	8,58549286	0,26913171	7,46693635	0,30013846	7,81077543	0,34885003

Raumformat x Nebenaufgabe		2D		EXO		PAN	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Fehlerrate [-]	Grundleist.	0,2425	0,01945548	0,2325	0,02441236	0,38	0,01810344
	MR	0,35	0,02440703	0,3875	0,02238978	0,4425	0,02336308
	VS	0,4325	0,01880894	0,39625	0,02273303	0,3525	0,02335193
	VG	0,3625	0,02231696	0,3275	0,02158438	0,32625	0,02224977
Detektionszeit [s]	Grundleist.	7,99192106	0,22836512	6,69651615	0,33868145	7,20869256	0,28047839
	MR	7,66700465	0,34455898	7,09246487	0,31586266	7,31887129	0,39358316
	VS	8,14645977	0,3029739	7,52410107	0,32300324	7,66673883	0,35101799
	VG	8,21829216	0,29821942	7,12831051	0,32369934	7,03292099	0,36917618

Raumformat x Konfliktnzahl		2D		EXO		PAN	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Fehlerrate [-]	Kein Konfl.	0,15	0,02486945	0,1975	0,02117327	0,35625	0,02898006
	1	0,36583333	0,02317031	0,31833333	0,02793842	0,31083333	0,02316532
	2	0,45916667	0,01853581	0,44583333	0,0178406	0,4525	0,01790213
Detektionszeit [s]	Kein Konfl.	8,88305676	0,30243858	7,81790952	0,28574503	8,04774451	0,345566
	1	7,65503998	0,21928491	6,60303883	0,28849368	7,06196499	0,31036614
	2	7,55520442	0,27718182	6,95024067	0,35915555	7,10088853	0,37799997

Raumformat x Fehlertyp		2D	EXO	PAN
Keine Antwort		0,03512881	0,0205296	0,01322216
Auslassungsfehler		0,27728337236534	0,18506397	0,11244789
Falscher Kontakt		0,18548009	0,25349598	0,39452055
Falscher Alarm		0,11241218	0,14459982	0,14151281
Sequenzfehler		0,38969555	0,39631062	0,33829661

Nebenaufgabe Fehlerrate [-]	MR		VS		VG	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
	0,34149137	0,03736402	0,4781922	0,02967528	0,27214822	0,02898115

Nebenaufgabe x Raumformat Fehlerrate [-]		MR		VS		VG	
		Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Grundleistung		0,20655172	0,02765264	0,24307692	0,02016743	0,07148148	0,01193295
2D		0,38834633	0,04558342	0,54433672	0,03539445	0,35146356	0,03878326
EXO		0,34194044	0,04281151	0,49843604	0,03689575	0,26979013	0,03204346
PAN		0,36165717	0,04133637	0,50936149	0,03852978	0,29552434	0,03524931

Anhang

Nebenaufgabe x Schwierigkeit Fehlerrate [-]	MR		VS		VG	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Grundleistung	0,20655172	0,02765264	0,24307692	0,02016743	0,07148148	0,01193295
Einfach	0,35896775	0,041948	0,50942154	0,03649279	0,29872249	0,03312596
Schwer	0,36899488	0,0417711	0,52533463	0,03153958	0,31246286	0,03504594

SART [1...7]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Bedarf an Aufm. (BA)	6,285	0,12717278	6,045	0,11678863	6,225	0,12332207
Verfügbarkeit von Aufm. (VA)	2,34	0,2295285	2,665	0,22170269	2,55	0,21794495
Verständnis der Situation (VS)	4,425	0,28731878	5	0,25586862	4,615	0,25103121

NASA TLX [0...100]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Geistige Anforderung (GA)	85,52	1,6134474	80,085	2,98686116	82,73	2,56595986
Körperliche Anforderung (KA)	18,775	3,47903692	17,96	3,24117166	18,77	4,00777032
Zeitliche Anforderung (ZA)	79,17	2,01423166	72,615	3,08484974	75,275	3,35248664
Aufgabenausführung (AA)	46,42	3,15908808	52,38	2,91152058	48,35	2,63384423
Anstrengung (AN)	78,18	2,09519639	74,19	2,59959051	76,09	2,49524047
Frustration (FR)	53,965	3,34214346	46,465	3,22278283	49,86	3,43863103

Ranking ZA [1...3]	MR		VS		VG	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Rangpunkte	2,60	0,12909944	2,24	0,11944315	1,16	0,07483315

Ranking Raumformat [1...3]	2D		EXO		PAN	
	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler	Mittelwert	Std. Fehler
Rangpunkte	2,48	0,130639	1,28	0,108321	2,24	0,144682

Anhang F – Hierarchische Task Analyse

